

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra aplikované mechaniky

**Materiálové modely plastů a jejich
implementace pro simulace crash-testů
světlometů**

**Material Models of Plastics and their
Implementation for Simulation of Headlamp
Crash Tests**

Student:

Bc. Daniel Rohel

Vedoucí diplomové práce

prof. Ing. Petr Horyl, CSc., dr.h.c.

Ostrava 2019

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Daniel Rohel**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3901T003 Aplikovaná mechanika
Téma: **Materiálové modely plastů a jejich implementace pro simulace
crash-testů světlometů**
**Material Models of Plastics and their Implementation for Simulation of
Headlamp Crash Tests**
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- 1) Mechanické modely polymerů - rešeršní studie
- 2) Problematika experimentů pro získání mechanických vlastností a jejich vyhodnocení
- 3) Simulace experimentů s nově upravenými materiálovými modely (reverzní modelování v LS-Dyna)
- 4) Počítačové simulace crash-testů reálných světlometů
- 5) Srovnání simulací s experimentem
- 6) Závěr a doporučení

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Firemní literatura Varroc Lighting Systems
- [2] LS-DYNA® KEYWORD USER'S MANUAL - VOLUME II Material Models
- [3] SIVIOUR, Clive R. a Jennifer L. JORDAN. High Strain Rate Mechanics of Polymers: A Review. Journal of Dynamic Behavior of Materials[online]. 2016, 2(1), 15-32 [cit. 2018-10-19]. DOI: 10.1007/s40870-016-0052-8. ISSN 2199-7446. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s40870-016-0052-8>
- [4] LOBO, Hubert. Methodology for Selection of Material Models for Plastics Impact Simulation [online]. 6th European LS-DYNA Users' Conference : Gothenburg, Sweden: ERAB, 2007. Dostupné z: <https://www.dynalook.com/european-conf-2007/methodology-for-selection-of-material-models-for.pdf>

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Petr Horyl, CSc., dr.h.c.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019


Ing. Martin Fusek, Ph.D.
vedoucí katedry

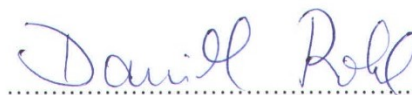



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20.5.2019

A handwritten signature in blue ink, reading "Daniel Rohl", written over a dotted line.

Podpis studenta

Prohlášení spolupracující osoby

Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 6, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v navazujících magisterských studijních programech VŠB-TU Ostrava.

Firma:

Varroc Lighting Systems, s.r.o.


sídlem Suvorovova 195, Šenov u Nového Jičína, PSČ 742 42

IČO 24304450

Jméno a příjmení oprávněné osoby:

Mgr. Jaroslav Haša
Global CAE Manager

V Šenově u Nového Jičína dne 20.5.2019.


.....
Podpis oprávněné osoby
(případně razítko)

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20.5.2019



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Daniel Rohel

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Skautská 2644
Frýdek-Místek

Upozornění

Vzhledem k výlučnému duševnímu vlastnictví dílčích výsledků práce podléhají některé grafy, tabulky či části kapitol utajení. Pro případ kontroly je plné znění této práce uloženo na Katedře aplikované mechaniky. Plné vypracování diplomové práce je určeno pouze oponentům a členům komise pro obhajobu, kteří jsou vázáni mlčenlivostí dle směrnice rektora TUO_SME_06_002 „Ochrana duševního vlastnictví“.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ROHEL, Daniel. *Materiálové modely plastů a jejich implementace pro simulace crash testů světlometů*. Ostrava, 2019. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce: Petr Horyl.

Diplomová práce se zabývá zjištěním mechanických vlastností polymerů, konkrétně polypropylenu plněného mastkem, a jejich implementaci do softwaru LS-DYNA pro využití v simulaci crash testů automobilových předních světlometů. Práce je pojata z praktického hlediska a klade důraz na jednoduchost a použitelnost v praxi. Neoddělitelná součást práce je validace simulací pomocí experimentů.

Klíčová slova

materiálové vlastnosti, polymer, simulace nárazu, rychlost poměrné deformace

ANNOTATION OF MASTER THESIS

ROHEL, Daniel. *Material Models of Plastics and their Implementation for Simulation of Headlamp Crash Tests*. Ostrava, 2019. Diploma Thesis. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Thesis supervisor: Petr Horyl.

Diploma thesis is observing mechanical properties of the polymers, specifically talc filled polypropylene, and its implementation to the software LS-DYNA for use in crash tests simulations of car headlamps. Thesis is focusing on practical point of view and it is emphasizing simple and useable procedures. Inseparable part of the thesis is validation of the simulations by experiments.

Key words

material parameters, polymers, crash simulation, strain rate

OBSAH

Seznam značek a symbolů	10
1 Úvod.....	12
2 Mechanické modely polymerů.....	13
2.1 Polymery	13
2.1.1 Polypropylen	13
2.2 Mechanické vlastnosti polymerů.....	14
2.2.1 Tranzitní teploty.....	14
2.2.2 Časově závislé chování polymerů.....	15
2.3 Modely polymerů	15
3 Experimentální stanovení vlastností materiálu	17
3.1 Volba experimentu	17
3.1.1 Konvenční tahová zkouška	18
3.1.2 Hopkinsonova dělená tyč.....	18
3.1.3 Vysokorychlostní tahové zkoušky	18
3.2 Provedené experimenty	19
3.3 Vyhodnocení experimentálních dat.....	21
3.3.1 Pracovní diagram	21
3.3.2 Rychlost poměrné deformace	22
3.3.3 Úprava dat.....	23
4 Simulace experimentu (Reversní modelování).....	28
4.1 Výběr materiálového modelu	28
4.2 Příprava dat pro materiálovou kartu.....	29
4.2.1 Rozdělení na elastickou a plastickou oblast	29
4.2.2 Popis rychlosti poměrné deformace.....	31
4.2.3 Převedení křivek na závislost napětí na plastické poměrné deformaci	34
4.3 Reversní modelování.....	35
4.3.1 Přímá integrace pohybových rovnic	35
4.3.2 Tvorba konečno-prvkové sítě	38
4.3.3 Okrajové a počáteční podmínky	39
4.3.4 Definice materiálové karty.....	39
4.3.5 Faktory ovlivňující výsledky výpočtu	40
4.3.6 Vyhodnocení simulace.....	41
5 Počítačová simulace crash testu reálného světlometu	45
5.1 Geometrie úlohy.....	45

5.2	Tvorba konečnoprvkové sítě	46
5.2.1	Sít' světlometu a její kvalita	46
5.2.2	Popis okolí světlometu	49
5.3	Okrajové a počáteční podmínky, kontakty	51
5.4	Materiálové definice	52
5.5	Nastavení výpočtu	53
5.6	Výsledky výpočtu	53
6	Srovnání simulací s experimentem	59
6.1	Popis experimentu	59
6.2	Srovnání výsledků	60
7	Závěr	65
7.1	Doporučení	68
	Seznam obrázků	71
	Seznam tabulek	72
	Seznam grafů	72
	Reference	73

Seznam značek a symbolů

Značka	Jednotka	Význam
A_0	[m ²]	Velikost původního průřezu
A	[m ²]	Velikost průřezu po zatížení
c_{3D}	[m/s]	Rychlost prostupu vlnění materiálem
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti
F	[N]	Zatěžující síla
f_i	[-]	Lineární interpolační faktor pro i - krok
L_0	[m]	Původní délka
L	[m]	Délka po zatížení
ΔL	[m]	Změna délky
l	[m]	Okamžitá délka
dl	[m]	Přírůstek okamžité délky
$\dot{\Delta L}$	[m/s]	Rychlost změny délky
l_{el}	[mm]	Minimální délka elementu
R^2	[-]	Parametr shody dat
ε_i	[-]	Poměrná deformace pro i - krok
$\varepsilon_{inž}$	[-]	Inženýrská poměrná deformace
ε_{log}	[-]	Logaritmická poměrná deformace
ε_{pl}	[-]	Plastická poměrná deformace
$\dot{\varepsilon}$	[1/s]	Rychlost poměrné deformace
$\tilde{\varepsilon}_k$	[1/s]	Konstantní rychlost poměrné deformace
$\dot{\varepsilon}_{log}$	[1/s]	Rychlost logaritmické poměrné deformace
μ	[-]	Poissonova konstanta
ρ	[kg/m ³]	Hustota materiálu
$\sigma(\varepsilon_i)$	[MPa]	Napětí v závislosti na poměrné deformaci v i – kroku
σ_Y	[MPa]	Mez kluzu
$\tilde{\sigma}_k$	[MPa]	Napětí při konstantní rychlosti poměrné deformace
σ_{skut}	[MPa]	Skutečné napětí
$\sigma_{inž}$	[MPa]	Inženýrské napětí
ω_{max}	[1/s]	Nejvyšší vlastní frekvence
$\mathbf{F}^{ext}(t)$	[-]	Vektor externích sil

$\mathbf{u}(t)$	[-]	Vektor posunutí
$\dot{\mathbf{u}}(t)$	[-]	Vektor rychlosti posunutí
$\ddot{\mathbf{u}}(t)$	[-]	Vektor zrychlení posunutí
\mathbf{D}	[-]	Matice tlumení
\mathbf{K}	[-]	Matice tuhosti
\mathbf{M}	[-]	Matice hmot
$\mathbf{T}(\varepsilon)$	[-]	Transformační matice
$\boldsymbol{\sigma}(\varepsilon)$	[-]	Matice napětí
$\tilde{\boldsymbol{\sigma}}(\varepsilon)$	[-]	Matice napětí za konstantní rychlosti poměrné deformace

1 Úvod

Zvyšující se nároky průmyslu, zejména automobilového, na použité materiály nutí automobilové společnosti používat nové typy materiálů. Snižování emisí se stalo globálním trendem automobilového průmyslu. Nejen proto je snahou dosahovat nižších hmotností jednotlivých dílců použitých v automobilu. Pro nároky na snižování odporu vzduchu, ale také pro nároky samotného designu je vhodné používat materiály, jenž jsou dobře tvarovatelné. Se zvyšujícími se legislativními požadavky na bezpečnost je nutné, aby byly také schopny dobře absorbovat nárazové zatížení.

Polymery vykazují dobrý kompromis mezi výše uvedenými požadavky a samotnou cenou materiálu. Mají nízkou hustotu, jsou tedy dostatečně lehké. Pomocí technologie vstřikování je možno vytvořit široké spektrum tvarů a velikostí tenkostěnných geometrií. Díky své schopnosti pojmout velké množství elastické i plastické poměrné deformace se polymery stávají také velmi využívaným materiálem pro nárazové plochy bezpečnostních prvků v automobilech jako například nárazníky nebo světlomety.

Nové typy využívaných materiálů společně se zvyšujícím se zájmem automobilových společností o simulace a výpočty a neustávajícím rychlým pokrokem výpočetních technologií otevírají dveře mnoha novým výzvám v oblastech experimentů, výpočtů či konstrukce.

Jedním z odvětví automobilového průmyslu, které hojně využívá polymerní materiály, je odvětví světelné techniky. Z hlediska crash testů světlometů existují tři hlavní oblasti, na která se výrobci zaměřují.

První oblastí jsou zákonné požadavky. Každé z aut distribuovaných v zemích Evropské unie musí splňovat zákonné požadavky pro ochranu chodců. Nárazovou plochou automobilu do potencionálního chodce je také přední světlomet.

Podobný typ výpočtu vyžadují také testy bezpečnosti instituce EURONCAP. Tato instituce nezávisle hodnotí bezpečnost osobních automobilů ze čtyř hledisek. Z hlediska ochrany dospělého a dětského pasažéra, z hlediska asistenčních bezpečnostních systémů a z hlediska ochrany chodců. Pro světlomety je důležité, přirozeně, poslední hledisko. Ochrana chodců se posuzuje z pohledu nárazu stehenní či holenní části nohy a z pohledu nárazu hlavy dospělého resp. dětského chodce.

Poslední oblastí je chování úchytů světlometů během nárazu a jejich potencionální opravitelnost. Toto specifikum je důležité pro některé zahraniční trhy, kde je opravitelnost světlometu zajímavým artiklem pro pojišťovací společnosti.

2 Mechanické modely polymerů

Polymery vykazují některá specifika, jenž je vhodné zmínit nejen z důvodu pozdější simulace crash testů, ale také pro nutné uvědomění si, co všechno je ve výpočtech zanedbáno a jak by se měly interpretovat výsledky výpočtů.

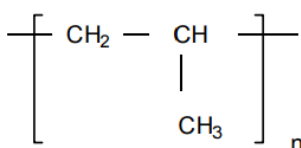
2.1 Polymery

Polymery jsou makromolekulární látky, které existují jak přírodní, tak syntetické. V přírodě se může jednat například o pryskyřici, či přírodní kaučuk [1]. Vznikají během polymerizační reakce spojením jednotlivých molekul (monomerů) do dlouhých řetězců bez standardizované délky.

Polymery se dají rozdělit na dvě hlavní skupiny: plasty a elastomery. Plasty dále na termoplasty a reaktoplasty. Termoplasty, dělí se na amorfní a semikrystalické, se vyznačují možnou vratnou změnou tuhého stavu na plastický účinkem zvýšené teploty. Nejčastěji obsahují lineární řetězce monomerů spojené pouze slabými van der Waalsovými silami. Díky tomu jsou velmi flexibilní a dokáží se značně plasticky deformovat. Naopak elastomery a reaktoplasty obsahují ve svých strukturách také silnější kovalentní vazby či větvení řetězců. Elastomery jsou houževnaté a mají řídké kovalentní vazby. Reaktoplasty jsou hustě větvené, chovají se tedy tvrdě a křehce. Elastomery ani reaktoplasty dokonce nejsou schopny návratu do plastického stavu [2]. K největšímu rozvoji došlo ve 20. století. Počátky užívání polypropyleny, jenž je hlavním materiálem této diplomové práce se vztahují k roku 1959 [3].

2.1.1 Polypropylen

Materiálem, kterým se primárně zabývá tato diplomová práce, je polypropylen. Řadí se k termoplastům. Má lineární strukturu polymerních řetězců. Vyznačuje se dobrou mechanickou odolností. Proto se hojně využívá v automobilovém průmyslu. Základním monomerem je propylen [2]. Ten bývá v automobilovém průmyslu používán s plnivem, případně vyztužovadly. Častým plnivem bývá křemičitan hořečnatý (neboli mastek). Vyztužovadlem bývají například skelná vlákna. Tato práce se zabývá konkrétně polypropylenem plněným ze 40% mastkem (PP-TD40) [2].



Obrázek 1- Schéma propyleny

2.2 Mechanické vlastnosti polymerů

Mechanické vlastnosti polymerů jsou určeny primárně pohybem polymerních řetězců v materiálu. Tento pohyb závisí na chemické struktuře polymeru. Kvůli neuspořádanosti řetězců a jejich rozdílné délce se polymery chovají vždy alespoň částečně amorfně. Poměr mezi krystalickou a amorfní fází se nazývá krystalinita.

Vazby mezi řetězci jsou tepelně lehce ovlivnitelné. Při zvyšování teploty se aktivuje pohyb a přeskupování řetězců což má za následek mimo jiné tzv. relaxační procesy (hlavně u amorfních polymerů, semikrystalické polymery relaxují ve značně omezené míře).

Bylo dokázáno, že rychlost poměrné deformace dokáže ovlivňovat tranzitní teploty materiálů, které přímo ovlivňují jejich mechanické vlastnosti. Poměrná deformace polymerů je tedy časově závislá [4].

2.2.1 Tranzitní teploty

Tranzitní teploty jsou hranice teplot, při jejichž překročení jsou možné změny mechanického chování materiálu bez dalšího vnějšího zasahování. Tyto teploty jsou rozdílné u amorfních a semikrystalických polymerů.

U amorfních polymerů je hlavní teplota skelného přechodu. Při růstu teploty narůstá energie v molekulách, rozšiřují se vazby a tím i roste objem. To platí do teploty skelného přechodu. Poté již mají molekuly dostatek energie na překonání mezimolekulárních vazeb, které zanikají a objem narůstá mnohem rychleji. Materiál se dostává do viskoelastické fáze a chová se kaučukovitě.

Semikrystalické polymery jsou charakterizovány hlavně teplotou tání. Řetězcové vazby jsou mnohem silnější, kratší (uspořádanost) a jejich četnost je hustší. Při dosažení teploty tání se polymer stává tekutým. Přejít do tekuté fáze je velmi rychlý.

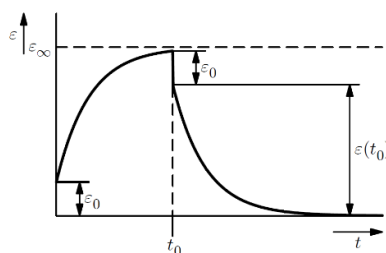
Obecně však platí, že polymery s dlouhými řetězci nemůžou být plně krystalizované (vždy vykazují alespoň částečně amorfní chování). Proto můžeme sledovat oba výše zmíněné fenomény u jednoho materiálu. Teplota skelného přechodu je obecně nižší než teplota tání. Chování materiálu mezi těmito teplotami tedy závisí na krystalinitě (procentuálním zastoupení amorfní a krystalické fáze).

Polymer se tedy při nízkých teplotách chová sklovitě. Při navýšení teploty k teplotě skelného přechodu se, po překlenutí přechodové fáze, začne chovat kaučukovitě. Toto chování závisí na krystalinitě polymeru. Při dalším růstu teplot přechází teplotu tání a stává se z něj tavenina. [2,4]

2.2.2 Časově závislé chování polymerů

Poměrná deformace polymerních materiálů je časově závislá. Chování polymerů se významně mění s rychlostí deformačního posunutí.

Pokud by byl polymer vystaven nárazovému konstantnímu napětí pod mezí kluzu, které by vybudilo poměrnou deformaci ε_0 , polymer by pokračoval v deformování až na určitou hodnotu ε_∞ . Po uvolnění napětí v čase t_0 dojde v elastické oblasti k opětovnému návratu na původní hodnoty, ovšem opět v závislosti na čase. Popisovaný fenomén je znázorněn na obrázku č. 2. Důsledkem takového chování může být například relaxace napětí. Na tento jev je třeba myslet při návrhu polymerních komponent. [4]



Obrázek 2 - Časová závislost poměrné deformace [4]

Při nízkých rychlostech poměrné deformace je u tahových zkoušek amorfních plastů možno sledovat vznik tzv. „křejzů“. Jde o protažené polymerní řetězce, mezi kterými se tvoří dutiny. U neprůhledných polymerů lze vidět zbělání. Objevují se v místech koncentrátorů napětí či nečistot v materiálu. [5] Toto nastalo u jednoho z prováděných experimentů pro tuto diplomovou práci. V dalších kapitolách tento fenomén vysvětluje některá naměřená data.

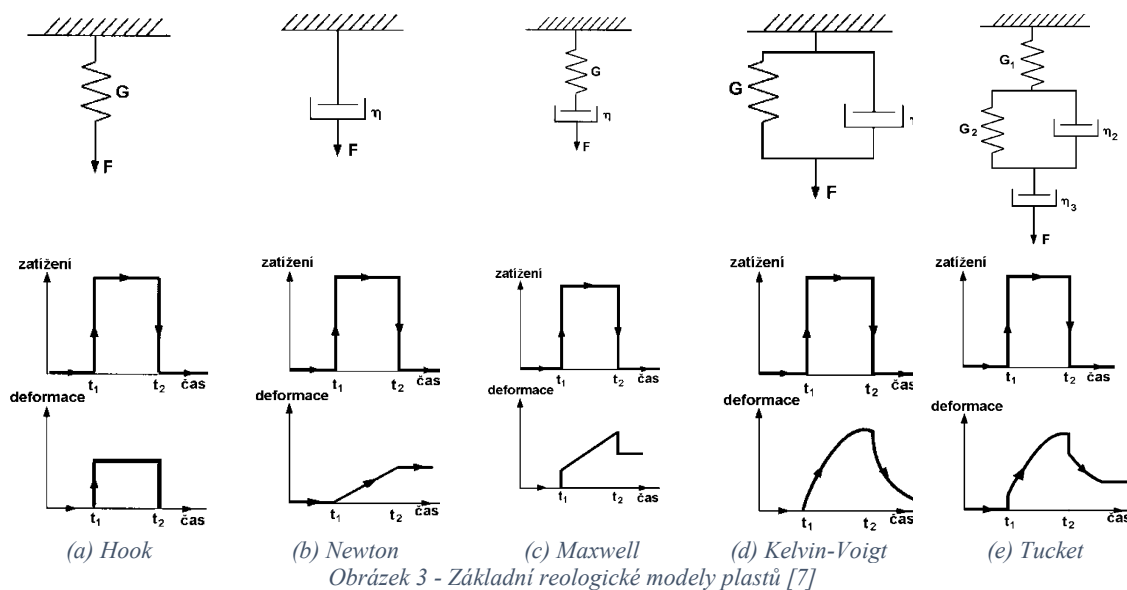
Hodnoty tranzitních teplot skelného přechodu se často pohybují pod hodnotami pokojových teplot. Bylo ovšem dokázáno, že při vysoké rychlosti poměrné deformace se zvyšují i tranzitní teploty. To v praxi znamená, že se při rychlém zatěžování dostávají polymery blíže k teplotě skelného přechodu a začínají se chovat více tvrdě a křehce [6].

2.3 Modely polymerů

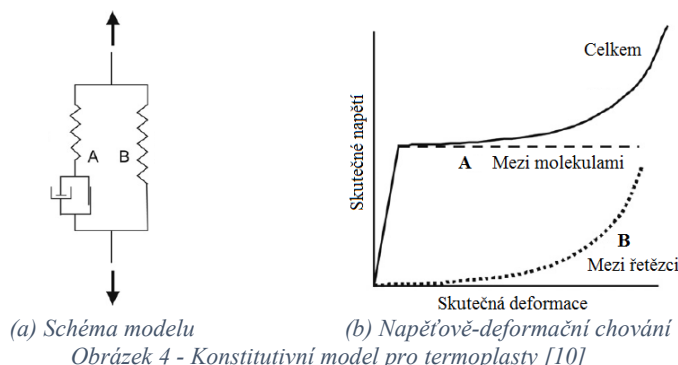
Vzhledem k neustálému vývoji v této oblasti budou zmíněny pouze některé z modelů. V teoretické části problematiky převládají tzv. reologické modely, tedy modely snažící se spojit chování kapalin a pevných látek. Jako pevný, ideálně elastický model materiálu je uvažována Hookeho pružina (obrázek 3(a)). Jako ideálně viskózní materiál je uvažována Newtonova vazká tekutina (obrázek 3(b)). Jejich sériovou kombinací vzniká model Maxwellův (obrázek 3(c)) a paralelní kombinací vzniká model Kelvin-Voigtův (obrázek 3(d)). Oba jsou vhodné pro popis plastů s dostatečnou přesností pouze pro určité typy namáhání. Kelvin-Voigtův model se dá využít pro popis creepu, Maxwellův model je

vhodnější pro popis relaxace napětí. [5,7] Dají se využít také Maxwellovy nebo Kelvinovy-Voigtovy řetězce (několik paralelních Maxwellových elementů, resp. několik sériových Kelvin-Voigtových elementů) [8]. Kombinací Maxwellova a Kelvin-Voigtova modelu se dá získat Tuckettův čtyřparametrický model (obrázek 3(e)). Ten se již dá využít k popisu viskoelastického chování. [4,7].

Při nižších teplotách převažuje elastická část modelu (pružiny), při zvyšování teploty se zvyšuje vliv viskózních prvků. Tyto modely však nepodchycují přechod k plasticitě za mezí kluzu.



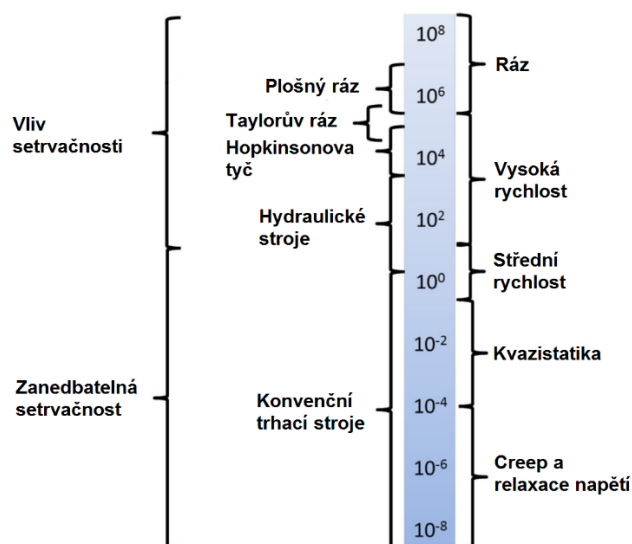
Mnoho matematických materiálových modelů rozvíjelo původní návrh Hawarda a Thackraye. Jejich model obsahuje paralelně Eyringův viskózní člen (představující vysokou vnitřní viskozitu) a pružinu s omezenou extenzí. S touto kombinací pak sériově zapojenou Hookeho pružinu s konstantním modulem pružnosti. [9] Zajímavý se jeví i konstitutivní, hyperelastický-viskoplastický model prezentovaný roku 2009 výzkumníky z Trondheimu. [10]. Využívá kritérium plasticity od autora Raghavy, který rozšířil všeobecně používané kritérium von Misesa o rozdílné chování v tlaku. [11] Funkci plasticity by měla představovat část A na obrázku 4 (a). Ta také znázorňuje interakci mezi samotnými molekulami. Část B reprezentuje interakci mezi jednotlivými řetězci polymerů. Předpokládaná závislost skutečného napětí a poměrné deformace tohoto modelu jsou na obrázku 4 (b).



3 Experimentální stanovení vlastností materiálu

Pro popsání chování materiálu při různých rychlostech deformačního posunutí bylo vyvinuto mnoho experimentálních přístupů. Mezi ně patří upravené kvazistatické uniaxiální testy, experimenty s padajícím závažím, metoda využívající Hopkinsonovu dělenou tyč, Taylorův test rázem či test plošným rázem.

Standardně využívané komerční přístroje většinou dokáží pokrýt pouze omezené spektrum rychlostí poměrných deformací. Řádově se jedná o rychlosti do 10 s^{-1} . Na obrázku 5 je schématické rozdělení těchto testů a jejich vhodnost vzhledem k očekávané rychlosti poměrné deformace přes rychlostní spektrum, které je pro inženýry zajímavé. Spektrum rychlostí je rozděleno do 16 řádů od nejpomalejších, které se projevují v řádech roků například tzv. creepem až po rázy v řádech nanosekund.



Obrázek 5 - Experimenty dle rychlosti poměrné deformace [6,12]

Pro potřeby simulace světlometů je, nejen podle zkušeností firmy, vhodno uvažovat rychlosti poměrných deformací od kvazistatických po střední až vysoké rychlosti v rozmezí přibližně od 10^{-2} s^{-1} do $5 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$. [15]

3.1 Volba experimentu

Jak je patrné z obrázku 5, ne všechny typy experimentů jsou vhodné pro stanovení vlastností materiálu v požadovaných mezích rychlostí poměrné deformace. Proto jsou rozebrány detailněji pouze tři. Dva z nich byly provedeny a jen jeden byl brán za směrodatný.

3.1.1 Konvenční tahová zkouška

Konvenční kvazistatické experimenty, kdy je vzorek tažen uniaxiálně patří mezi nejrozšířenější materiálové testy. Čistě mechanické strojní soustavy jsou dnes nahrazovány pokročilými elektromechanickými a servohydraulickými systémy s aktivním řízením. Byly provedeny také experimenty využívající oscilaci výchylky. Frekvence kmitání výchylky u úspěšných testů se přibližovala až k hodnotě 100 Hz. Předpokládaná rychlost poměrné deformace byla vypočtena ze změny poměrné deformace za časový úsek, a to homogenně skrze celý testovaný vzorek. Pohybovala se v rozmezí od $1,9 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ až $3,2 \times 10^{-1} \text{s}^{-1}$. [6,13] To znamená, že tento typ experimentu nedokáže spolehlivě popsat chování materiálu pro celé spektrum námi požadovaných rychlostí poměrné deformace.

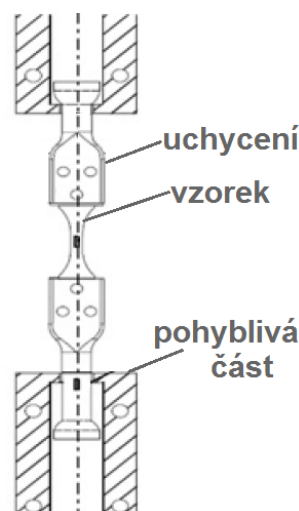
3.1.2 Hopkinsonova dělená tyč

U oceli je často využíván experiment pomocí Hopkinsonovy dělené tyče, který zjišťuje chování materiálu při vysokých rychlostech, primárně v tlaku. Je založen na přetvoření vzorku mezi dvěma tyčemi vybuzenými na rezonanční frekvenci. Byly vyvinuty také modifikace tohoto experimentu pro tah či krut. Ovšem rychlosti poměrných deformací zjišťované pomocí této metody se pohybují řádově mezi $10^2 - 10^4 \text{s}^{-1}$. [6,14] Z tohoto důvodu je experiment nevhodný pro tuto aplikaci, jelikož popisuje chování materiálu při rychlosti vyšší, než která je aktuálním zájmem.

3.1.3 Vysokorychlostní tahové zkoušky

Experimenty zjišťující chování materiálu mezi výše zmíněnými hranicemi jsou velkou výzvou. Hlavním problémem je skutečnost, že požadované rychlosti se ztlačně blíží vlastním frekvencím testovacích strojů. Experiment znesnadňuje také nutnost překonat setrvačnost testujícího aparátu. Je nutné, aby deformační posuv ve vysoké rychlosti byl aplikován v co nejkratším čase (eliminace rozjezdu stroje) [6].

Tyto zkoušky stále postrádají standardizaci a jsou předmětem zkoumání. V poslední době se využívají servohydraulické stroje. Pro výše zmíněnou eliminaci rozjezdu se využívá upravené uchopení vzorku. Toto uchopení je schematicky znázorněno na obrázku 6. Spodní pohyblivá část je schopna získat požadovanou rychlost, aniž by během toho zatěžovala zkušební vzorek. Na začátku zatěžování vzorku ovšem dojde k rázu, který vybudí kmitání celé soustavy.



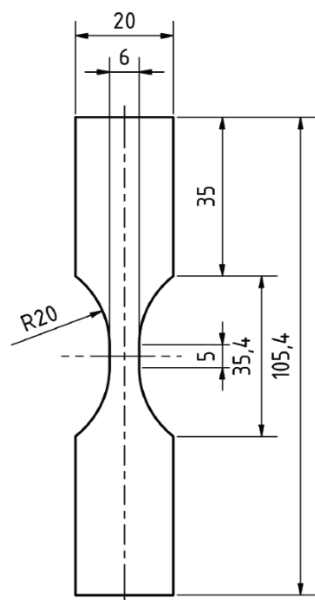
Obrázek 6 - Schéma uchycení vzorku [15]

Dalším fenoménem znesnadňující evaluaci výsledků měření je fakt, že polymery vyrobené technologií vstřikování plastů mohou lokálně vykazovat rozdílné vlastnosti, což ovlivňuje chování celého vzorku. [16] Z tohoto důvodu je nutno zajistit získání dat přímo z kritické oblasti vzorku. K tomuto účelu se využívají vysokorychlostní kamery a pokročilé metody zpracování obrazu. Tato fakta znatelně zvyšují cenu experimentů.

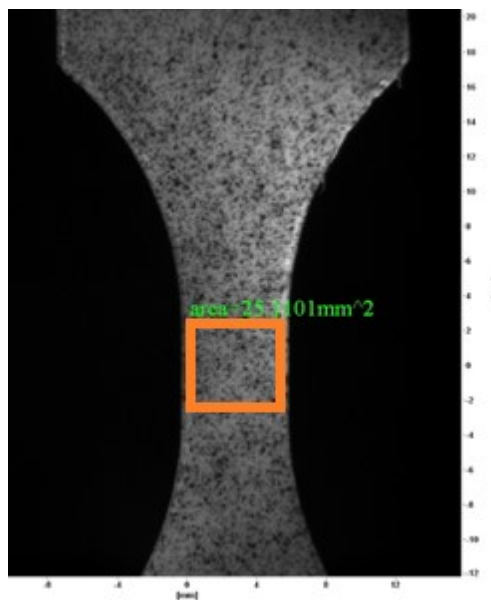
3.2 Provedené experimenty

Byly provedeny konvenční tahové zkoušky v rychlostech, které jsou umožněny stroji, jimiž disponuje laboratoř firmy. Ovšem vzhledem k omezeným možnostem z hlediska vybavení a omezeným počtem vzorků, byly tyto zkoušky pouze informativní.

Navíc byly externě provedeny vysokorychlostní tahové zkoušky, které jsou v této práci brány za směrodatné. Geometrie vzorku je vykreslena na obrázku č. 7. Součástí tohoto měření bylo také zapojení digitálního vyhodnocování obrazu pomocí vysokorychlostních kamer. Hodnoty, měřené pomocí kamer, byly zjišťovány pouze lokálně na potenciálně kritickém místě vzorku. Zaměřená oblast byla tvaru čtverce o délce strany 5 mm. Zobrazeno na obrázku č. 8.



Obrázek 7 - Geometrie vzorku



Obrázek 8 - Oblast zaměřena kamerou

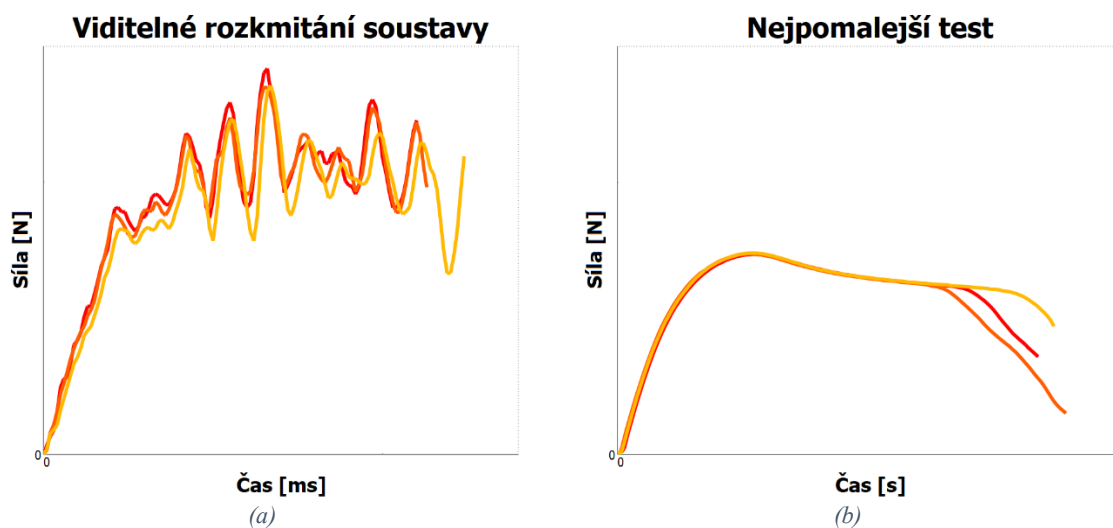
Testováno bylo celkem 40 vzorků při 4 rozdílných rychlostech, tedy 10 vzorků na každou rychlost. Z každých 10 vzorků byly vybrány 3 reprezentativní, u kterých nedošlo k žádné vážnější komplikaci během testu (např. proklouznutí uchycení vzorku apod.). Rychlosti trhání vzorku, počet snímaných datových bodů a doba testu jsou uvedeny v tabulce 1 technické zprávy [27].

Rychlost zatížení	Počet zachycených snímků	Doba do lomu

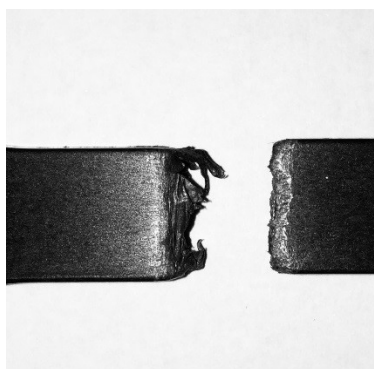
Tabulka 1 - Informace o testech – obsahem technické zprávy [27]

Na těchto experimentech se projevil výše zmiňovaný nežádoucí fenomén rozkmitání celé testující soustavy. Proto je vyhodnocení těchto dat velice obtížné a je nutno přistupovat k mnoha kompromisům a zjednodušením. Rozkmitání soustavy při vyšších rychlostech je patrné z grafu 1(a), popisujících časový průběh reakčních sil během experimentu. Navíc, po srovnání s grafem 1(b), lze na první pohled vidět, že síla aplikovaná na vzorek musí být vyšší při vyšší rychlosti zatěžování. Pro viditelnost průběhu bylo nutné rychlejší test popisovat v milisekundách.

Z grafu 1(b) lze poznat, že rychlost poměrné deformace u nejpomalejšího experimentu je natolik nízká, že umožnila vznik „křejzů“, které byly zmiňovány výše v podkapitole 2.2.2. Tento fakt způsobuje značný pokles sil v pozdější fázi experimentu. Pro lepší představu je přiložen obrázek 9, který ukazuje „křejzy“ vzniknuvší při testu o stejné pomalé rychlosti tahu vzorku ve firemní laboratoři. Při tvorbě „křejzů“ se značně oslabuje průřez. V případě konvenční evaluace výsledků měření je tedy vhodné brát data během tvorby „křejzů“ se značnou rezervou. Konkrétní hodnoty v grafech jsou obsahem technické zprávy [27].



Graf 1 - Časová odezva sil – data jsou obsahem technické zprávy [27]



Obrázek 9 - Vznik „krezů“

3.3 Vyhodnocení experimentálních dat

Vzhledem ke komplexnosti chování materiálu je během procesu vyhodnocování experimentu nutno zanedbat některé skutečnosti.

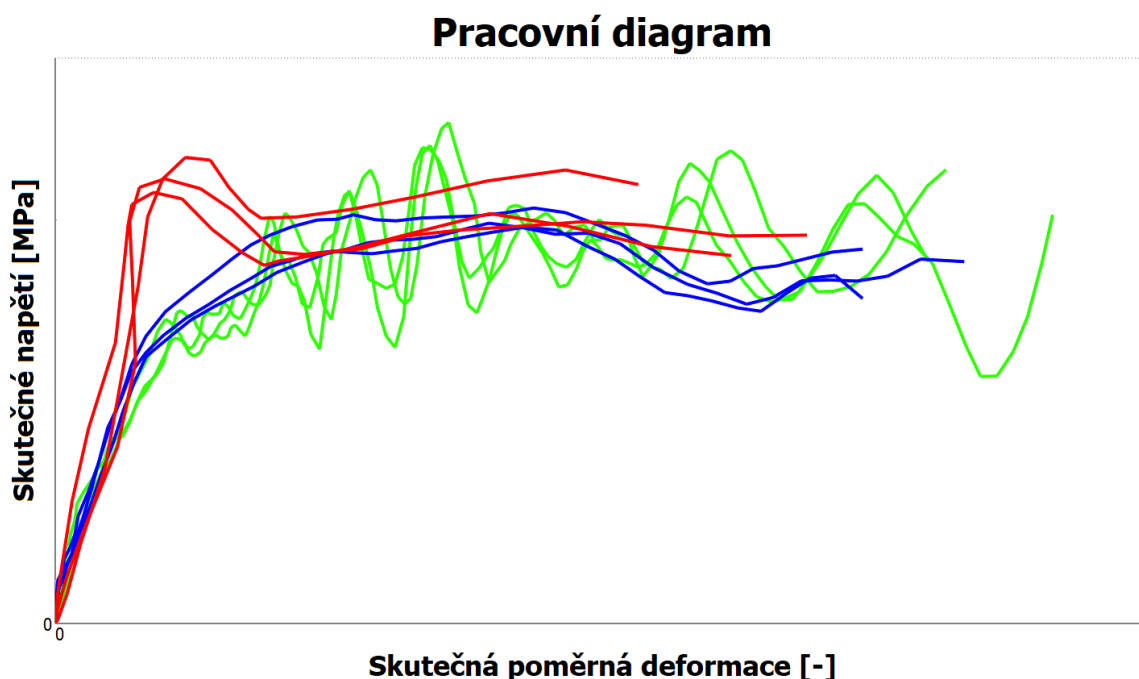
3.3.1 Pracovní diagram

Z primárně naměřených hodnot sil bylo vypočteno skutečné napětí dle vztahu (2). Ten byl odvozen na základě předpokladu zachování objemu (vztah (1)). Součin původního průřezu A_0 a původní délky L_0 je roven součinu těchto veličin po deformování.

$$A_0 \cdot L_0 = A \cdot L \rightarrow \frac{L}{L_0} = \frac{A_0}{A} \quad (1)$$

$$\sigma_{skut} = \frac{F}{A} = \frac{F}{A} \cdot \frac{A_0}{A_0} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{L}{L_0} = \sigma_{inz} \cdot \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = \sigma_{inz}(1 + \varepsilon_{inz}) \quad (2)$$

Je nutno zmínit a brát v úvahu, že u termoplastů nemusí vždy platit předpoklad zachování objemu, ze kterého vychází odvození skutečného napětí. [10] V rámci zachování jednoduchosti řešení je toto zanedbáno. Pracovní diagram je na grafu č.2. Konkrétní data jsou obsahem technické zprávy [27]. Je očividné, že naměřená data bude nutné před použitím upravit. Není nutno upravovat data z kvazistatické zkoušky, jelikož výstup je dostatečně kvalitní a datové body jsou dostatečně husté.



Graf 2 - Pracovní diagramy– data jsou obsahem technické zprávy [27]

3.3.2 Rychlost poměrné deformace

Předpokládá se, že rychlost poměrné deformace není v celém vzorku konstantní a je ovlivněna geometrií. Rychlost kleštín při experimentu se tedy nedá brát jako směrodatná vzhledem k rychlosti poměrných deformací. Proto musí být tato rychlost vypočtena. K tomuto účelu budou využita data z oblasti zaměřené vysokorychlostními kamerami.

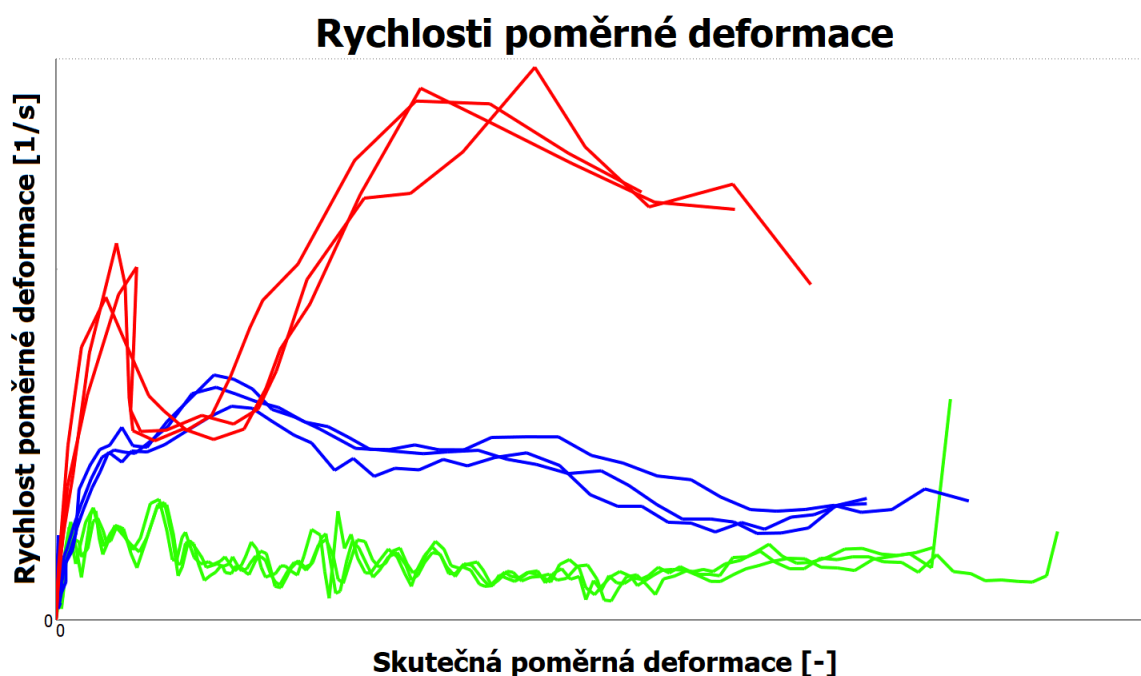
Vycházejíc z definice logaritmické deformace (3)

$$\varepsilon_{log} = \int_{L_0}^L \frac{dl}{l} = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0} \right) \quad (3)$$

je možno po časové derivaci získat vztah uvedený v rovnici (4).

$$\dot{\varepsilon}_{log} = \frac{d\varepsilon_{log}}{dt} = \frac{d}{dt} \ln \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0} \right) = \frac{1}{1 + \frac{\Delta L}{L_0}} \cdot \frac{d}{dt} \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0} \right) = \frac{\frac{\dot{\Delta L}}{L_0}}{1 + \frac{\Delta L}{L_0}} = \frac{\dot{\Delta L}}{L_0 + \Delta L} \quad (4)$$

Hodnota původní délky L_0 v rovnici (4) je v případě využití dat z kamer rozměr sledované oblasti, tedy 5 mm (viz obrázek 8). Změna délky ΔL i její časová derivace (tedy rychlost změny délky sledované oblasti) jsou změřeny. Vypočtená data jsou zobrazena v grafu 3. Konkrétní hodnoty jsou obsahem technické zprávy [27]. Také v průběhu rychlosti poměrné deformace jsou znatelné výkyvy způsobené rozkmitáním měřicí soustavy. V grafu nejsou zobrazeny rychlosti poměrné deformace testu o rychlosti tahu 1 mm/min, jelikož tyto hodnoty jsou vůči rychlým testům velice nízké. Z tohoto důvodu budou později některé grafy zobrazující rychlost poměrné deformace vykresleny v semilogaritmickém měřítku.



Graf 3 - Vypočtené rychlosti poměrných deformací – data jsou obsahem technické zprávy [27]

3.3.3 Úprava dat

Jak je na první pohled patrné z grafů 2 a 3, je nutno data získaná rychlostní zkouškou upravit do použitelné podoby.

Vzhledem k výlučnému duševnímu vlastnictví dílčích výsledků práce podléhá část této kapitoly utajení. Pro případ kontroly je plné znění práce uloženo na Katedře aplikované mechaniky.

4 Simulace experimentu (Reversní modelování)

Pro veškeré konečnoprvkové analýzy je využit explicitní řešič LS-DYNA. Nedílnou součástí každé analýzy je popis materiálových parametrů. Software LS-DYNA nabízí široké spektrum možných materiálových modelů. Proto je na místě se zmínit alespoň o těch nejzajímavějších pro daný případ. Ne všechny materiálové modely vyžadují stejnou definici materiálových parametrů, proto musí být již upravená materiálová data z kapitoly 3 modifikována dle požadavků jednotlivých materiálových modelů. Za zmínku také stojí fakt, že nejčastěji využívané materiálové modely, jenž jsou již nabízeny softwarem LS-DYNA, nedokáží podchytit některé fyzikální jevy popisované v předchozích kapitolách. Příčinou je upřednostnění jednoduchosti modelu. Modely určené přímo pro polymery jsou buď velice náročné na kvalitu a množství vstupních dat (více nutných experimentů) nebo zanedbávají mnoho faktů. Tato práce je orientována praktickým směrem, je tedy na místě brát v potaz hlavně materiálové modely, jenž jsou použitelné v praxi a pro něž existuje dostatek vstupních dat. Z výše zmíněného důvodu je jasné, že praxe modelování crash testů stále zaostává za teorií, které se primárně věnuje kapitola 2.

4.1 Výběr materiálového modelu

Ačkoliv byly v podkapitole 2.3 popsány sofistikovanější materiálové modely, jak již bylo zmíněno výše, jejich aplikace v praxi značně zaostává. Proto bylo pro praktické využití nutné udělat značné ústupky již při výběru materiálového modelu.

Explicitní řešič LS-DYNA nabízí několik potenciálně vhodných materiálových modelů pro modelování termoplastů. Po systematickém rozboru jednotlivých modelů, doporučení od oficiální podpory uživatelů LS-DYNA a hlavně po přihlédnutí k firemním zkušenostem a faktům prezentovaným na konferencích byly vybrány dva vhodné materiálové modely:

MAT24	MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
MAT89	MAT_PLASTICITY_POLYMER

Materiálový model MAT24 je jedním z aktuálně nejpoužívanějších materiálových modelů pro aplikace jako jsou crash analýzy. Předpokládá lineární elastickou oblast, která je nezávislá na rychlosti poměrné deformace. Od určitého bodu (mez kluzu) začne být brána tato rychlost v potaz. Mez kluzu je shodná pro všechny křivky stejně jako modul pružnosti v tahu, což naznačuje určitý limit modelu. Není tedy možno zachytit rozdílnost v elastické oblasti (graf 12, obsahem technické zprávy [27]). Naproti tomu materiálový model MAT89 nevyžaduje rozdělení na elastickou a plastickou část. Prakticky to znamená, že LS-DYNA předpokládá, že když se sníží směrnice křivky pod hodnotu modulu pružnosti, tak materiál plastizuje. To přináší výhody, avšak také omezení. Plasticita je poté řešena stejně jako u MAT24. Největší výhoda MAT24 oproti MAT89 je v možnosti zahrnout do výpočtu viskoplastickou formulaci efektů rychlosti poměrných deformací. Standardně jsou tyto efekty vypočteny z tenzoru rychlosti poměrné deformace. Při zahrnutí viskoplastické

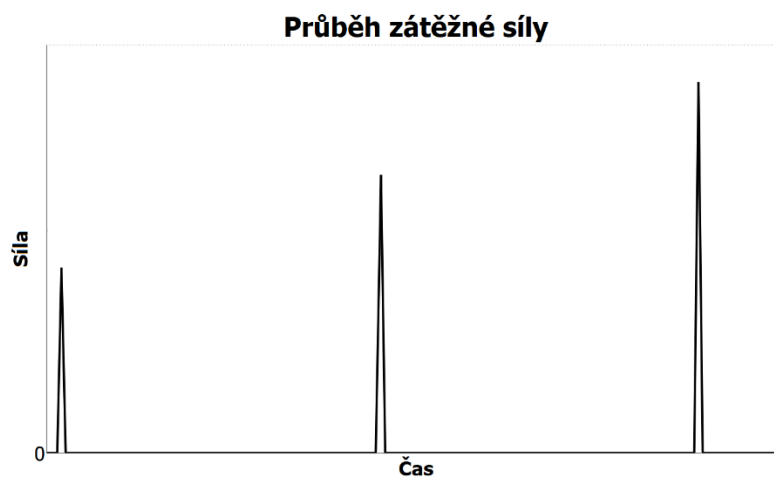
formulace do výpočtu jsou efekty počítány pouze z plastické části tenzoru rychlosti poměrné deformace. V praxi to znamená, že rychlosti poměrných deformací jsou lehce zatlumeny a méně kmitají. Tato volba je také doporučována podporou uživatelů LS-DYNA. Praktické efekty na chování modelu budou rozebrány níže. Tato formulace je hlavním důvodem, proč je pro následující práci zvolen materiál MAT24. [17,18,19,25]

4.2 Příprava dat pro materiálovou kartu

Výstup z experimentu (graf 12, obsahem technické zprávy [27]) je nutno ještě dále upravit tak, aby byla data vhodná pro vyplnění materiálové karty. Z podkapitoly 4.1 je zřejmé, že je nutné sjednotit elastickou oblast jednotlivých křivek, to znamená najít jeden modul pružnosti a jednu mez kluzu.

4.2.1 Rozdělení na elastickou a plastickou oblast

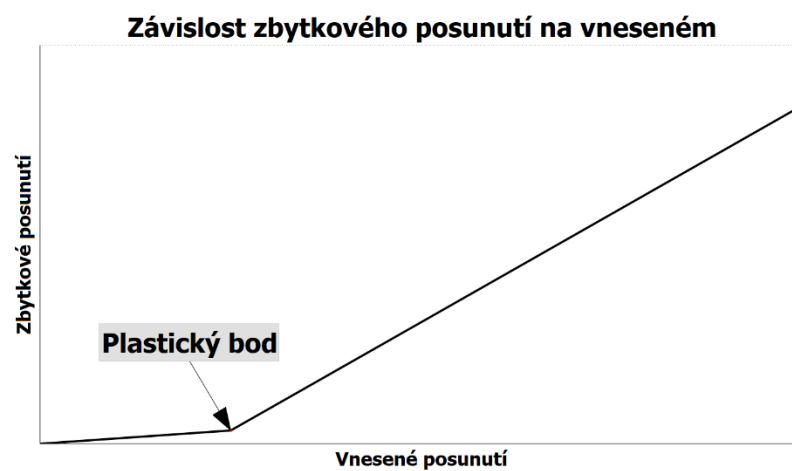
Určení meze kluzu u termoplastů je velkou výzvou. Pro tento účel se dá navrhnout experiment spočívající v postupném zatížení vzorku, poté úplném odlehčení a následně ponechání vzorku čas pro relaxaci. Toto se opakuje se zvyšující se zátěžnou silou. Vždy po zrelaxování jsou měřeny zbytkové poměrné deformace. Ty se začínou rapidně zvyšovat při dosažení tzv. plastického bodu materiálu [20]. Pro ilustraci myšlenky experimentu jsou zatížení v čase, poměrná deformace v čase a její závislost na vnesené poměrné deformaci zobrazeny v grafech 13, 14 a 15. Jde o ilustrativní grafy, proto nejsou uvedeny jednotky. Experiment vzhledem k finančním limitům nebyl proveden. Dle [20] se plastický bod u mnoha typů termoplastů nachází až na nelineární části křivky. Naskýtají se tedy dvě možnosti, jak popsat elastickou část křivky. Určit mez kluzu již před plastickým bodem (graf 16 bod A), takže plastické chování modelu nastane dříve než v realitě nebo určit mez kluzu v plastickém bodě (graf 16 bod B). Varianta B by sice důkladněji popsala přechod k plastickému chování, avšak by podhodnotila nutnou práci pro přetvoření. Vybrána byla varianta A. V simulacích crash testů nedochází k výrazné reverzi zatěžování, proto není nutné popsat přechod k plasticitě tak důkladně za cenu podhodnocení materiálu. Modul pružnosti byl určen na základě určení meze kluzu. Při určování těchto hodnot bylo přihlíženo primárně ke křivkám popisující experimenty zatěžované nižšími rychlostmi (konkrétní hodnoty jsou obsahem technické zprávy [27]), jelikož jsou považovány za nejpřesnější. Dle definice MAT24 je také vyžadováno, aby křivky, popisující závislost napětí na poměrné deformaci, neklesaly, což nastávalo u 1 mm/min křivky. Proto byla manuálně navýšena její směrnice. Křivky po úpravách jsou zobrazeny na grafu 17 společně s původními křivkami z experimentu. Údaje popisující elastickou část křivek jsou v tabulce 2, která je součástí technické zprávy [27].



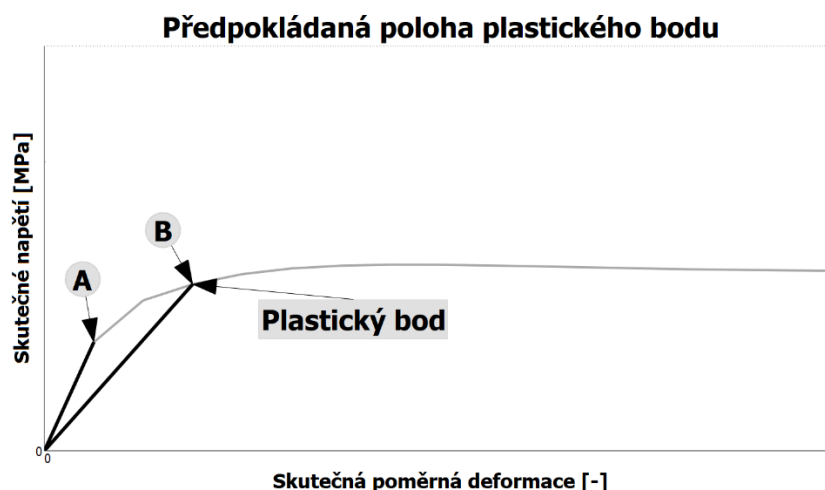
Graf 4 - Průběh zátěžné síly u experimentu [20]



Graf 5 - Průběh poměrné deformace po aplikaci zátěžné síly [20]



Graf 6 - Závislost zbytkové poměrné deformace na poměrné deformaci vzniklé po aplikaci zátěžné síly [20]



Graf 7 - Možnosti určení počátku plasticity a poloha plastického bodu [20]



Graf 8 - Křivky se sjednocenou elastickou částí – kompletní graf je obsahem technické zprávy [27]

Elastický modul pružnosti	[MPa]	
Mez kluzu	[MPa]	

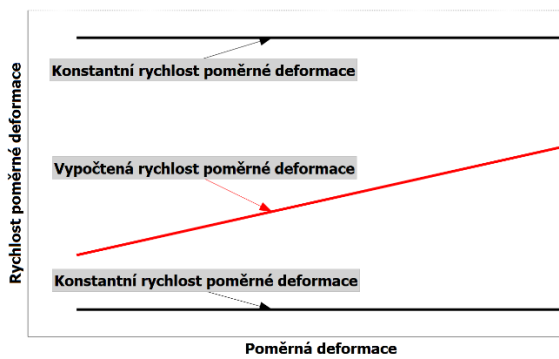
Tabulka 2 - Veličiny popisující lineární elasticitu – tabulka je obsahem technické zprávy [27]

4.2.2 Popis rychlosti poměrné deformace

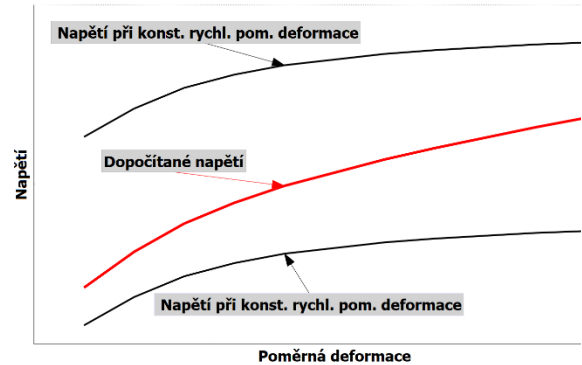
Další nejednoduchou záležitostí je fakt, že křivky popisující závislost napětí na poměrné deformaci by měly popisovat chování materiálu při konstantní rychlosti poměrné deformace. Jak je zřejmé například z grafu 3, toto není splněno. Existuje několik možností, jak dále postupovat. Přepočítat napěťově deformační křivky o nekonstantní rychlosti poměrné deformace na křivky s konstantní hodnotou nebo přistoupit k zanedbání faktu, že aktuální křivky nepopisují materiál za konstantní rychlosti poměrné deformace a najít průměrnou hodnotu u jednotlivých křivek, případně si zvolit jednu z křivek a škálovat hodnoty napětí. Poslední zmíněná možnost zanáší do postupu největší chybu a ztrácí během procesu experimentálně získaná data. Proto nebude uvažována.

4.2.2.1 Přepočet na křivky o konstantní rychlosti poměrné deformace

Tato metoda vychází z přístupu interpolace LS-DYNA. LS-DYNA má zadány napětově deformační křivky o konstantní rychlosti poměrné deformace a její hodnoty. Během výpočtu se rychlost poměrné deformace dopočítává a dle aktuální hodnoty se interpoluje napětově deformační chování materiálu mezi křivkami o konstantních hodnotách. Pro ilustraci zobrazeno na grafech 18 a 19. Černé křivky jsou vstupy LS-DYNA, značené v rovnících vlnkou, červené jsou výstupy. Řešič LS-DYNA je nastaven tak, že v případě překročení nejvyšší hodnoty konstantní rychlosti poměrné deformace se již napětí nezvyšuje a zůstává v platnosti nejvýše položená křivka napětí. Stejný případ nastává u velmi nízkých rychlostí (vysvětleno dále na příkladu v rovnici (8)).



Graf 9 - Průběh rychlosti poměrné deformace [21]



Graf 10 - Průběh napětí [21]

Pro každou hodnotu poměrné deformace se dopočte lineární interpolační faktor dle rovnice (4) [21].

$$0 \leq f_i(\varepsilon_i) = \frac{\dot{\varepsilon}(\varepsilon_i) - \tilde{\varepsilon}_k}{\tilde{\varepsilon}_{k+1} - \tilde{\varepsilon}_k} \leq 1 \quad (4)$$

Lineární interpolační přepočet se řídí podle rovnice (5) [21].

$$\sigma(\varepsilon_i) = [1 - f_i(\varepsilon_i)] \cdot \tilde{\sigma}_k(\varepsilon_i) + f_i(\varepsilon_i) \cdot \tilde{\sigma}_{k+1}(\varepsilon_i) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} i &= 1 \dots n \\ k &= 1 \dots K \end{aligned}$$

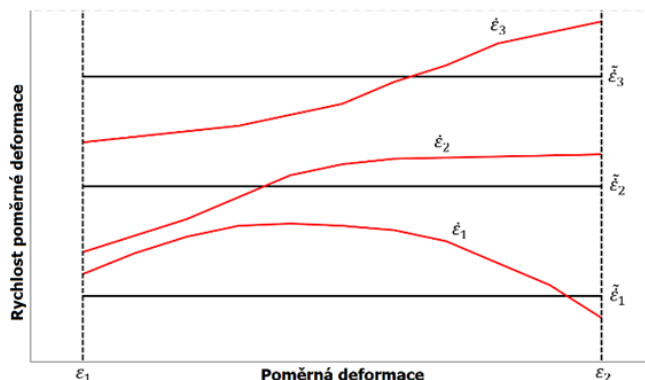
n počet datových bodů
 K celkový počet křivek

Například pro $K = 1$ a $n = 10$ je nutné vycházet ze 2 křivek napětí o konstantní rychlosti poměrné deformace. Vypočetl by se interpolační faktor a poté by se vyřešila rovnice (5). Toto by se opakovalo v 10 iteracích.

V případě $K > 1$ přechází rovnice v maticovou rovnici (6).

$$\sigma(\varepsilon) = T(\varepsilon)\tilde{\sigma}(\varepsilon) \quad (6)$$

Matice T je transformační matice sestavená z interpolačních faktorů. Během výpočtu se bude měnit v závislosti na hodnotě aktuální rychlosti poměrné deformace $\dot{\varepsilon}(\varepsilon_i)$. Transformační matice bude mít v případě grafu 20 při hodnotě ε_1 podobu rovnice (7) a při hodnotě ε_2 rovnice (8). [21]



Graf 11 - Příklad změny transformační matice [21]

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \quad \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - f_1 & f_1 & 0 \\ 1 - f_2 & f_2 & 0 \\ 0 & 1 - f_3 & f_3 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\sigma}_1 \\ \tilde{\sigma}_2 \\ \tilde{\sigma}_3 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_2 \quad \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - f_2 & f_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\sigma}_1 \\ \tilde{\sigma}_2 \\ \tilde{\sigma}_3 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\text{pro } \varepsilon = \varepsilon_1 \quad f_1 = \frac{\dot{\varepsilon}_1(\varepsilon_1) - \tilde{\varepsilon}_1}{\tilde{\varepsilon}_2 - \tilde{\varepsilon}_1} \quad f_2 = \frac{\dot{\varepsilon}_2(\varepsilon_1) - \tilde{\varepsilon}_1}{\tilde{\varepsilon}_2 - \tilde{\varepsilon}_1} \quad f_3 = \frac{\dot{\varepsilon}_3(\varepsilon_1) - \tilde{\varepsilon}_2}{\tilde{\varepsilon}_3 - \tilde{\varepsilon}_2}$$

Pro $\varepsilon = \varepsilon_2$ obdobně.

Proces pro přepočet na křivky o konstantní rychlosti je poté inverzní k výše uvedenému. Maticově tedy dle rovnice (9). [21]

$$\tilde{\sigma}(\varepsilon) = T^{-1}(\varepsilon)\sigma(\varepsilon) \quad (9)$$

Ačkoliv má tento postup velký potenciál, po kontrole v MATLABU bylo zjištěno, že je velice citlivý na vstupní data, která byla již na počátku velmi ovlivněna kmitáním měřicí soustavy. Proto se stávajícími experimentálními možnostmi není možné tento postup využít. Jediná možnost se vyskytuje v popsání průběhu rychlosti poměrné deformace jednoho z testů a tento poté škálovat, avšak to by do dat zaneslo pouze více nepřesností a nebylo by to k aktuálnímu užítku. Tento postup je zajímavý pro dobře naměřená experimentální data bez větších odchylek. Ačkoliv se podařilo aplikovat postup dle [21], nebyly výsledky, po aplikaci na experimentální data, vhodné k dalšímu použití.

4.2.2.2 Finální určení hodnot konstantní rychlosti poměrných deformací

Z důvodů zmíněných výše je nutné zanedbat fakt, že během experimentu se rychlost poměrné deformace mění. Proto byla určena průměrná hodnota jednotlivých křivek. Průměr byl počítán pouze od určené meze kluzu, čímž se částečně eliminoval vliv náběh této rychlosti. Výsledné hodnoty jsou zapsány v tabulce 3, která je součástí technické zprávy [27].

Experiment	Rychlost poměrné deformace [s ⁻¹]

Tabulka 3 - Stanovené hodnoty – tabulka je obsahem technické zprávy [27]

4.2.3 Převedení křivek na závislost napětí na plastické poměrné deformaci

Protože MAT24 sjednocuje lineární elastickou část chování materiálu, vyžaduje jako vstup pro materiálovou kartu pouze závislost chování materiálu během plastické poměrné deformace. Využitím aditivního zákona inkrementální teorie plasticity a Hookova zákona pro jednoosé namáhání byla z celkové poměrné deformace odečtena elastická složka (10). Výsledná podoba dat je znázorněna na grafu 21, který je obsahem technické zprávy [27].

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon - \frac{\sigma_Y}{E} \quad (10)$$

Kde σ_Y je mez kluzu, E elastický modul pružnosti a ε_{pl} plastická poměrná deformace.



Graf 12 - Data po přepočtu na plastickou poměrnou deformaci – kompletní graf je obsahem technické zprávy [27]

4.3 Reversní modelování

Proces reversního modelování je v tomto případě simulace experimentu s cílem získat původně naměřená data. Jak bylo zmíněno výše, k simulacím byl využit řešič LS-DYNA.

4.3.1 Přímá integrace pohybových rovnic

Metody přímé integrace pohybových rovnic jsou využívány pro řešení transientních úloh dynamiky. Jsou vhodné pro analýzy strukturální dynamiky případně analýzy šíření vlnění. Mají také velké uplatnění pro silně nelineární problémy [22]. Na rozdíl od metod modálních není u metod přímé integrace nutné modifikovat pohybové rovnice. Pro jednoduchost je v popisu metody předpokládána linearita problému. Potom budou pohybové rovnice v maticovém tvaru

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{F}^{ext}(t) \quad (11)$$

kde \mathbf{M} je matice hmotnosti, \mathbf{D} je matice tlumení, \mathbf{K} je matice tuhosti, \mathbf{F}^{ext} je vektor vnějších sil a \mathbf{u} je vektor posunutí.

Řešení probíhá tzv. krok za krokem, takže se čas v rovnici (11) musí rozdělit na časové kroky. Pro lepší přehlednost bude tedy používán indexovaný zápis (12), kde index n označuje konkrétní časový krok. Délka kroku bude značena Δt , tedy celkový čas analýzy se dá popsat jako $n \cdot \Delta t$.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_n + \mathbf{D}\dot{\mathbf{u}}_n + \mathbf{K}\mathbf{u}_n = \mathbf{F}^{ext}_n \quad (12)$$

Předpokládá se, že matice hmotnosti je pozitivně definitní a matice tuhosti pozitivně semidefinitní. Tato vlastnost umožňuje tzv. pohyb tuhého tělesa, což je zásadní aspekt pro některé typy simulací (například s impaktorem). Metody přímé integrace pomocí metod konečných diferencí nahrazují derivace vektoru posuvů \mathbf{u}_n konečnými diferencemi tohoto vektoru. Metody přímé integrace se dělí na dvě hlavní varianty: explicitní a implicitní. Explicitní varianta využívá pro výpočet vektoru posunutí pouze výsledky z předchozích kroků, kdežto implicitní varianta vyžaduje také budoucí první a druhou derivaci tohoto vektoru. LS – DYNA využívá modifikovanou explicitní variantu, která bude blíže popsána ve své obecné podobě. [22,23]

4.3.1.1 Explicitní metoda

Taylorovým rozvojem se dají polynomicky aproximovat hodnoty funkce, která má v daném bodě derivaci. Počet nutných derivací závisí na počtu členů rozvoje. Pro případ explicitní metody postačí tři členy Tylorova polynomu (13), jsou tedy nutné dvě existující derivace, což by z podstaty dynamiky tuhého tělesa mělo být splněno.

$$f(x) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 \quad (13)$$

V (13) vystupuje funkce $f(x)$, tedy funkce, která má být aproximována v bodě a . Po aplikaci na tento případ může být psáno

$$\mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{u}_n + \dot{\mathbf{u}}_n \Delta t + \ddot{\mathbf{u}}_n \frac{\Delta t^2}{2} \quad (14)$$

$$\mathbf{u}_{n-1} = \mathbf{u}_n - \dot{\mathbf{u}}_n \Delta t + \ddot{\mathbf{u}}_n \frac{\Delta t^2}{2} \quad (15)$$

Po sečtení resp. odečtení rovnic (14) a (15) je získáno vyjádření pro první (16) a druhou (17) centrální diferencí.

$$\dot{\mathbf{u}}_n = \frac{1}{2\Delta t}(\mathbf{u}_{n+1} - \mathbf{u}_{n-1}) \quad (16)$$

$$\ddot{\mathbf{u}}_n = \frac{1}{\Delta t^2}(\mathbf{u}_{n+1} - 2\mathbf{u}_n + \mathbf{u}_{n-1}) \quad (17)$$

Chyba vznikající u této aproximace je druhého řádu, tedy přímo úměrná Δt^2 . Praktickým význam tohoto faktu je, že použitím polovičního časového kroku je možno získat čtvrtinovou chybu aproximace. [22]

Dosazením (16) a (17) do pohybové rovnice (12) lze po osamostatnění vektoru \mathbf{u}_{n+1} získat vyjádření

$$\left(\frac{\mathbf{M}}{\Delta t^2} + \frac{\mathbf{D}}{2\Delta t}\right)\mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{F}^{ext}_n - \mathbf{K}\mathbf{u}_n + \frac{2\mathbf{M}}{\Delta t^2}\mathbf{u}_n + \frac{\mathbf{D}}{2\Delta t}\mathbf{u}_{n-1} - \frac{\mathbf{M}}{\Delta t^2}\mathbf{u}_{n-1} \quad (18)$$

Po přijetí zjednodušujícího předpokladu (19) se rovnice (18) zjednoduší na soustavu lineárních algebraických rovnic (20).

$$\frac{\mathbf{D}}{2\Delta t}(\mathbf{u}_{n-1} - \mathbf{u}_{n+1}) = \frac{\mathbf{D}}{\Delta t}(\mathbf{u}_{n-1} - \mathbf{u}_n) \quad (19)$$

$$\mathbf{u}_{n+1} = \Delta t^2 \mathbf{M}^{-1} \left[\mathbf{F}^{ext}_n + \left(\frac{2\mathbf{M}}{\Delta t^2} - \frac{\mathbf{D}}{\Delta t} - \mathbf{K} \right) \mathbf{u}_n + \left(\frac{\mathbf{D}}{\Delta t} - \frac{\mathbf{M}}{\Delta t^2} \right) \mathbf{u}_{n-1} \right] \quad (20)$$

4.3.1.2 Startovací procedura

Jak je vidět z rovnice (20), pro výpočet vektoru posunutí je nutné znát vektor posunutí v předchozím kroku, což pro počátek výpočtu není známá hodnota. Proto se využívá startovací procedura, která vychází ze znalosti počátečních hodnot vektoru posunutí a jeho první derivace, tedy \mathbf{u}_0 a $\dot{\mathbf{u}}_0$. Využívá se k tomu již odvozená rovnice (15) vycházející z Taylorova rozvoje. Proto je možno psát

$$\mathbf{u}_{-1} = \mathbf{u}_0 - \dot{\mathbf{u}}_0 \Delta t + \ddot{\mathbf{u}}_0 \frac{\Delta t^2}{2} \quad (21)$$

kde vektory \mathbf{u}_0 a $\dot{\mathbf{u}}_0$ jsou známy z počátečních podmínek a vektor $\ddot{\mathbf{u}}_0$ musí být dopočten z pohybové rovnice pro počáteční stav (vycházejíc z rovnice (12))

$$\ddot{\mathbf{u}}_0 = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{F}^{ext}_0 - \mathbf{D}\dot{\mathbf{u}}_0 - \mathbf{K}\mathbf{u}_0) \quad (22)$$

4.3.1.3 Definice časového kroku

Výše uvedená rovnice (20) je podmíněně stabilní a její požadavek na stabilitu limituje délku časového kroku podle (23).

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{max}} \quad (23)$$

kde ω_{max} je nejvyšší vlastní frekvence, pro jednoduchý případ dle

$$\det(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) = 0 \quad (24)$$

Při nesplnění podmínky (23) výpočet exponenciálně diverguje. V limitním případě stability, tedy rovnosti rovnice (23) může řešení divergovat v určitých případech [22]. Kritická hodnota minimálního časového kroku se v LS-DYNA počítá pro 3D element z rychlosti prostupu vlnění materiálem

$$\Delta t_{min} = \frac{l_{el}}{c_{3D}} \quad (25)$$

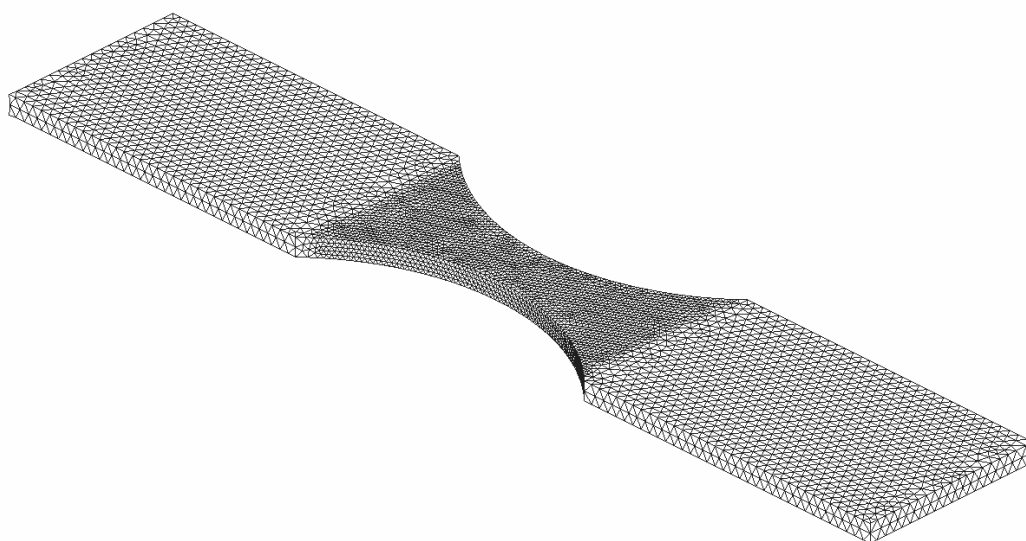
kde l_{el} je minimální délka elementu, c_{3D} rychlost vlnění dle (26)

$$c_{3D} = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)\rho}} \quad (26)$$

kde E je modul pružnosti v tahu, μ je Poissonova konstanta a ρ je hustota materiálu [24].

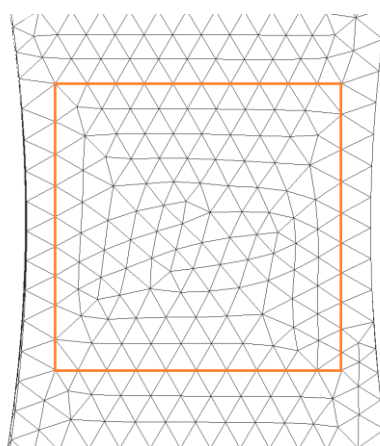
4.3.2 Tvorba konečno-prvkové sítě

K diskretizaci geometrie vzorku byl použit preprocessingový software ANSA. Po vymodelování geometrie podle specifikací (viz obrázek 7) a vytvoření povrchové sítě byla vytvořena objemová síť. Ta je tvořena 10-uzlovými kvadratickými tetra elementy (v LS-DYNA typ 16). Jde o elementy s meziuzly a 5 integračními body. Typ elementu byl vybrán na základě standardních výpočetních procesů firmy. V praxi nabízí mnohem jednodušší proces tvorby sítě, což je významný aspekt vzhledem ke komplexnosti geometrie světlometu. Zároveň patří k nejdetailnějším tetraedrovým elementům z nabízených LS-DYNA, toto je vykoupeno násobně delším výpočetním časem. Vizualizace konečno-prvkové sítě je na obrázku 10. Pro diskretizaci geometrie bylo celkem použito 72 218 elementů.



Obrázek 10 - Síť konečných prvků na vzorku

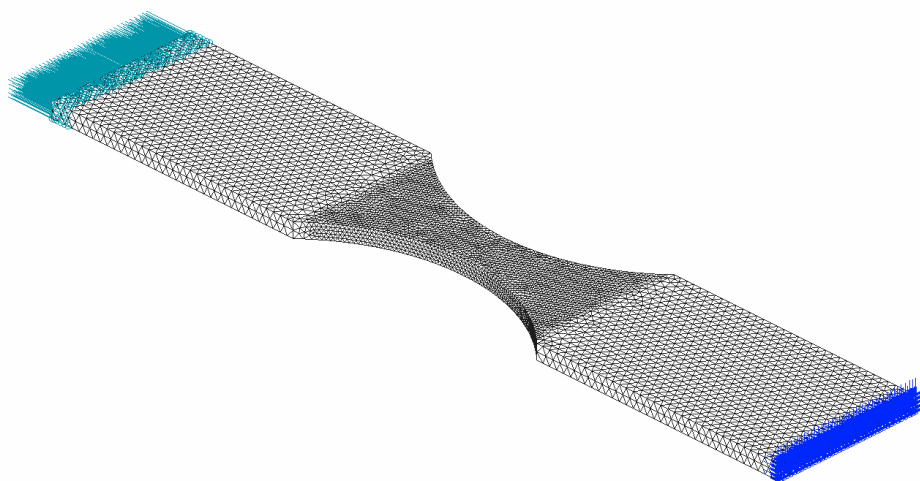
Síť byla připravena takovým způsobem, aby v oblast, na které se opticky získávaly experimentální data (obrázek 8), byla jednoznačně určitelná, což zjednodušuje průměrování výstupních hodnot simulace. Detail na obrázku 11.



Obrázek 11 - Detail na síť vzorku

4.3.3 Okrajové a počáteční podmínky

Pro uchycení vzorku byly využity tzv. SPC („single point constraints“) vazby. Ty byly aplikovány přímo na uzly a odebíraly všechny stupně volnosti. Na druhou stranu vzorku byla předepsána rychlost pohybu jednotlivých uzlů. Ta byla nastavena na stejné hodnoty rychlostí jako v experimentech (konkrétní hodnoty jsou obsahem technické zprávy [27]). Do předpisu rychlosti byl zahrnut i náběh síly. Grafické znázornění na obrázku 12. Modře SPC vazby, tyrkysově předepsaný pohyb uzlů.



Obrázek 12 - Okrajové a počáteční podmínky

4.3.4 Definice materiálové karty

Konkrétní definice materiálu v tabulce 4 uvedené v jednotkách, ve kterých standardně pracuje LS-DYNA v případě Crash analýz. Tabulka je obsahem technické zprávy [27].

Označení v LS-DYNA	Hodnota	Jednotka	Veličina

Tabulka 4 - Konkrétní definice materiálové karty – tabulka je obsahem technické zprávy [27]

4.3.5 Faktory ovlivňující výsledky výpočtu

Do výpočtu vstupuje mnoho faktorů, které mohou ovlivnit výstupy simulace. Je nutné toto ovlivnění výsledků předpokládat.

4.3.5.1 Viskoplastická formulace rychlosti poměrné deformace

Jak je uvedeno v tabulce 4, tato formulace byla pro výpočty využita. Při zapnutí této funkce řešič nepočítá standardně tenzor rychlosti poměrné deformace na základě tenzoru deformace, ale pouze z jeho plastické části. V praxi to znamená, že jsou zatlumeny a potlačeny efekty rychlého děje při elastickém chování materiálu, což je vhodnější varianta pro případ materiálové karty MAT24, kde jsou efekty rychlosti poměrné deformace zahrnuty až od překročení meze kluzu. Tato varianta definice materiálu se ukázala jako klíčová v přesnosti výpočtu [25].

4.3.5.2 Škálování hmotnosti

Škálování hmotnosti je technika, při které je přidána imaginární hustota materiálu do nejmenších elementů za účelem dosažení většího explicitního časového kroku (viz rovnice (25),(26)). Kdykoliv je tato hmota během dynamické analýzy přidána, jsou výsledky ovlivněny. Proto je nutné, aby množství přidané hmotnosti mělo na výsledky zanedbatelný účinek, jelikož může být ovlivněna kinematika výpočtu. Vzhledem k relativně malému výpočtovému modelu byla přidávána pouze zanedbatelná hustota do nejmenších elementů. Celkově bylo do modelu vneseno navíc pouze $1,048 \times 10^{-2}$ g hmoty, což odpovídá 0,24 % hmotnosti celého vzorku [26].

4.3.5.3 Hourglass efekt

V explicitních analýzách se v některých případech využívají elementy s redukovanou jednobodovou integrací. Simulace jsou s nimi značně rychlejší, avšak je u nich možné vyvolat deformace bez vyvolání reakčních sil (Hourglass mód / mód nulové energie). Pro odstranění tohoto efektu je nutná umělá stabilizace. Také z tohoto důvodu byly použity elementy s pěti integračními body, které nejsou redukovány do jednoho integračního bodu [24].

4.3.6 Vyhodnocení simulace

Výpočetní model se v jednotlivých analýzách neměnil, měnily se pouze okrajové podmínky, konkrétně velikost stálé rychlosti.

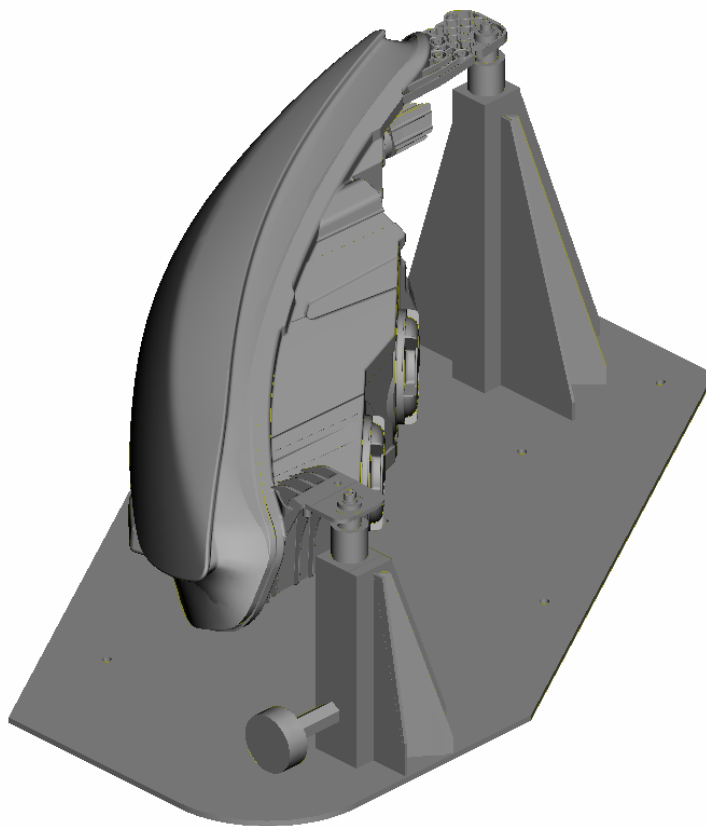
Vzhledem k výlučnému duševnímu vlastnictví dílčích výsledků práce podléhá část této kapitoly utajení. Pro případ kontroly je plné znění práce uloženo na Katedře aplikované mechaniky.

5 Počítačová simulace crash testu reálného světlometu

Primárním cílem této simulace je validace chování materiálu v reálných podmínkách. Simulována byla situace, jenž byla experimentálně otestována. Jde o náraz impaktoru do čelního světlometu vozidla. Cílem je posouzení chování materiálu na základě zkušeností a analýza rozložení sil v úchytech světlometu, jenž byly při experimentu naměřeny. Modelován byl světlomet včetně jeho uchycení v přípravku.

5.1 Geometrie úlohy

Geometrie světlometu byla vytvořena v 3D CAD softwaru CATIA a byla převzata od konstrukčního oddělení firmy. K tomu byl domodelován přípravek. Impaktor byl vytvořen přímo konečnoprvkovými elementy. Geometrie byla po importu do software ANSA tvořena povrchovými plochami. Zobrazení geometrie, tedy bez impaktoru, lze vidět v izometrickém pohledu na obrázku 13. Celá geometrie musela být tzv. „vyčištěna“. Znamená to odstranění veškerých penetrací ploch, přemodelování tzv. jehlovitých ploch nebo odstranění imperfekcí mezi jednotlivými křivkami na plochách.



Obrázek 13 - Geometrie světlometu s přípravkem

5.2 Tvorba konečnoprvkové sítě

Pro zjednodušení výpočtu byla zanedbána veškerá elektronika uvnitř světlometu. Zanedbány byly také veškeré vnější kryty, konektory či chladicí elementy, které nebyly zahrnuty ani do experimentu a nemají stěžejní vliv na chování struktury při nárazu. Přípravek, jako tenkostěnná ocelová struktura, byl modelován pomocí 2D plošných elementů. Světlomet, tenzometrické senzory i doraz impaktoru byly modelovány 3D elementy.

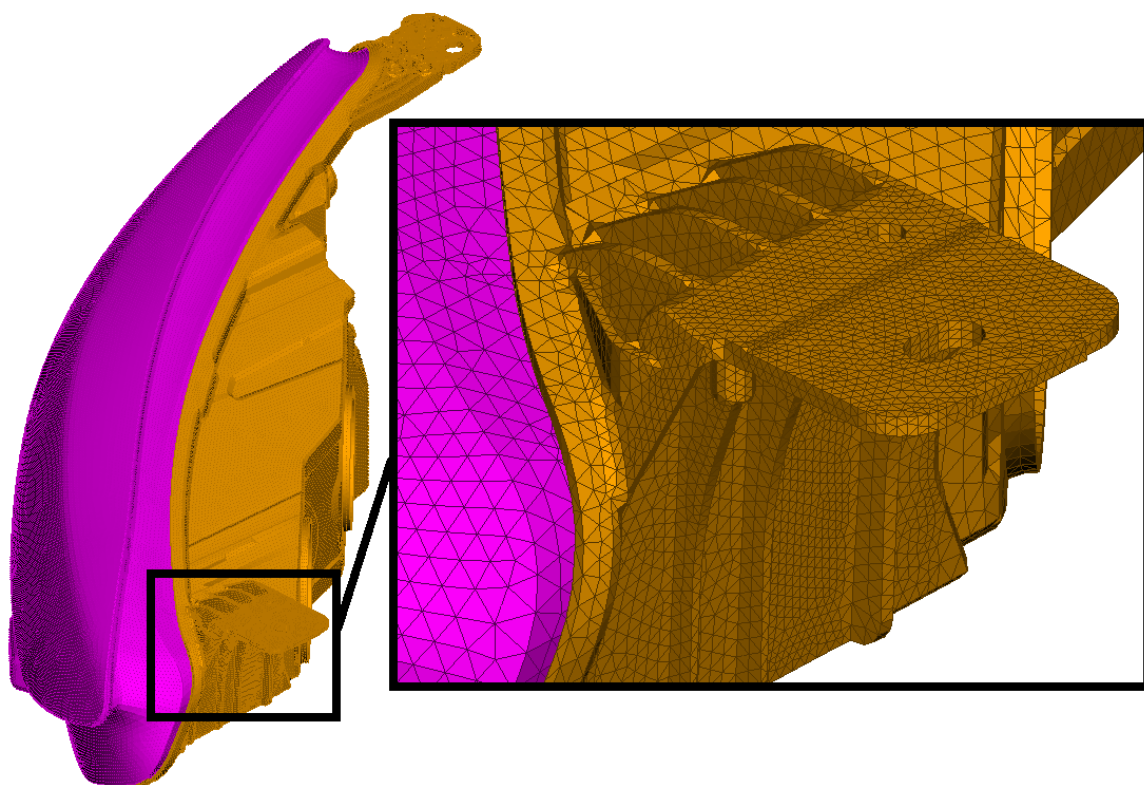
5.2.1 Sít' světlometu a její kvalita

Prvotně byla vytvořena povrchová sít' na světlometu. Kvalita povrchové sítě byla posuzována podle pěti kritérií zmíněných níže. Způsob síťování byl založen na interních doporučeních firmy. Pro efektivitu práce je důležité, aby byla příprava modelu relativně rychlá. Proto, vzhledem k vysoké geometrické komplexnosti modelu, bylo nutno volit trojúhelníkové elementy. Z přibližného celkového počtu 125000 elementů povrchové sítě světlometu níže zmiňovaná kritéria nesplňuje 24 elementů. Jde hlavně o parametr zešíkvení elementu, a to v místech se složitou geometrií, která nejsou zásadní pro chování během nárazu (oblasti připojování konektorů na opačné straně nárazu impaktoru). Naopak jako kritická místa, vyžadující kvalitnější sít', byly vyhodnoceny úchyty světlometu, jelikož v těchto místech dojde k lomu. Je tedy důležité podchytit geometrii těchto oblastí co nejlépe. Elementy na úchytech se blížily nejnižším hraničním velikostním kritériím. Zobrazeno i s detailem vnitřního (vzhledem k umístění v automobilu) úchyty na obrázku 14, detail sítě vnějšího úchyty na obrázku 15. Zde je také vidět detail sítě v oblasti žebrování.

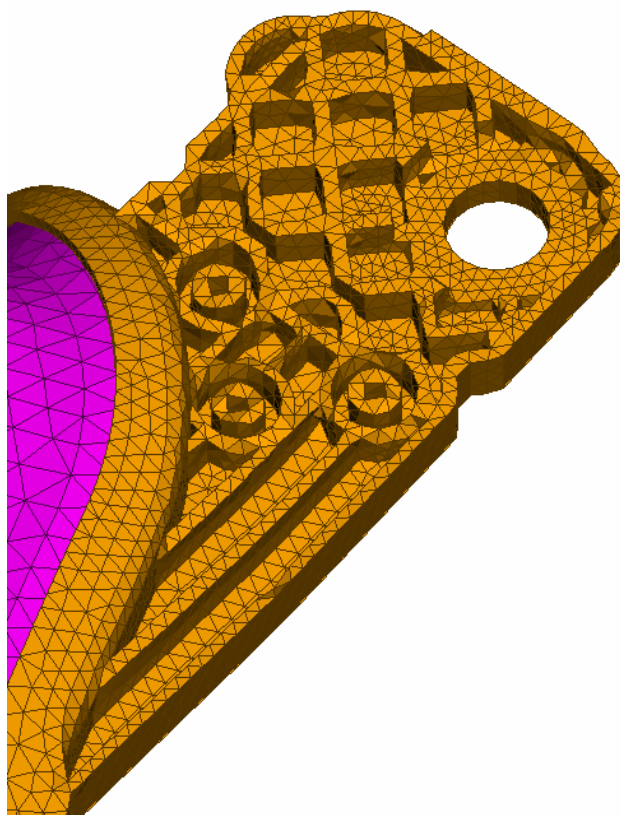
V tuto chvíli je nutné si uvědomit hardwarovou limitaci. Z hlediska výpočetních časů není možné mít ve všech místech materiálu alespoň tři elementy na tloušťku geometrie. Tento fakt je značně limitující, avšak dle zkušeností firmy je stále výhodnější přijmout toto omezení než modelovat čistě plošnými elementy, které nedokáží dostatečně podchytit detaily konstrukce a průběh lomu na úchytech.

Povrchová sít' byla vytvořena primárně bez meziuzlů. Všechny tyto elementy byly poté přetransformovány na elementy druhého řádu. Následně byla sít' pomocí automatických nástrojů softwaru ANSA z povrchu dotvořena do objemové sítě. Všechny elementy povrchové sítě elementu jsou trojúhelníkové, objemová sít' je tedy tvořena, tak jako u kapitoly 4, 10-uzlovými kvadratickými tetra elementy.

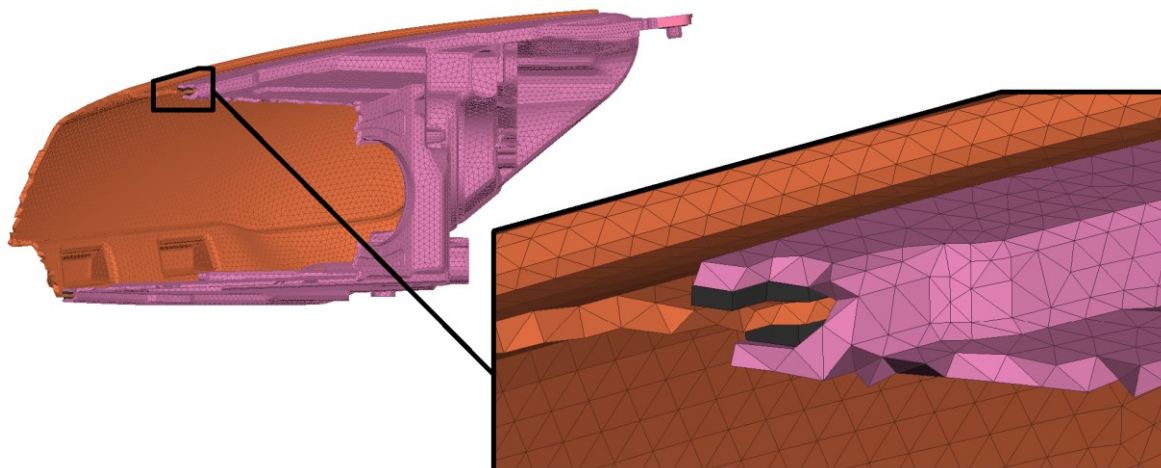
Jak je zřejmé z obrázků 14 a 15, čelní krycí sklo a pouzdro světlometu jsou dvě rozdílné geometrie. Musí proto být v analýze spojeny. Způsob spojení je realizován vrstvou elementů, které jsou definovány jako ideálně elastický materiál a představují lepidlo. Pro zobrazení je na obrázku 16 řez modelu po hranicích elementů s detailem na jejich spojení. Elementy představující lepidlo jsou vybarveny černou barvou. Elementy poté byly z obou stran připojeny k pouzdru i krycímu sklu pomocí svázaného kontaktu (tied).



Obrázek 14 - Detail zjemnění sítě v oblasti vnitřního úchytu



Obrázek 15 - Detail sítě na žebrování vnějšího úchytu



Obrázek 16 - Detail spojení pouzdra světlometu a krycího skla – lepidlo černou barvou

Základní kritéria kvality povrchové sítě světlometu:

- **Poměr délek stran (aspect ratio)**

Posuzováno podle kritérií řešiče NASTRAN. Maximální poměr délek stran každého elementu nesmí překročit hodnotu 5.

- **Zešikmení (skewness)**

Posuzováno podle kritérií řešiče NASTRAN. Minimální vnitřní úhel trojúhelníkového elementu nesmí přesahovat 15°.

- **Zborcení (warping)**

Připadá v úvahu až u trojúhelníkových elementů s meziuzly. Úhel mezi normálami k plochám jednoho elementu nesmí přesáhnout 10°.

- **Délka časového kroku**

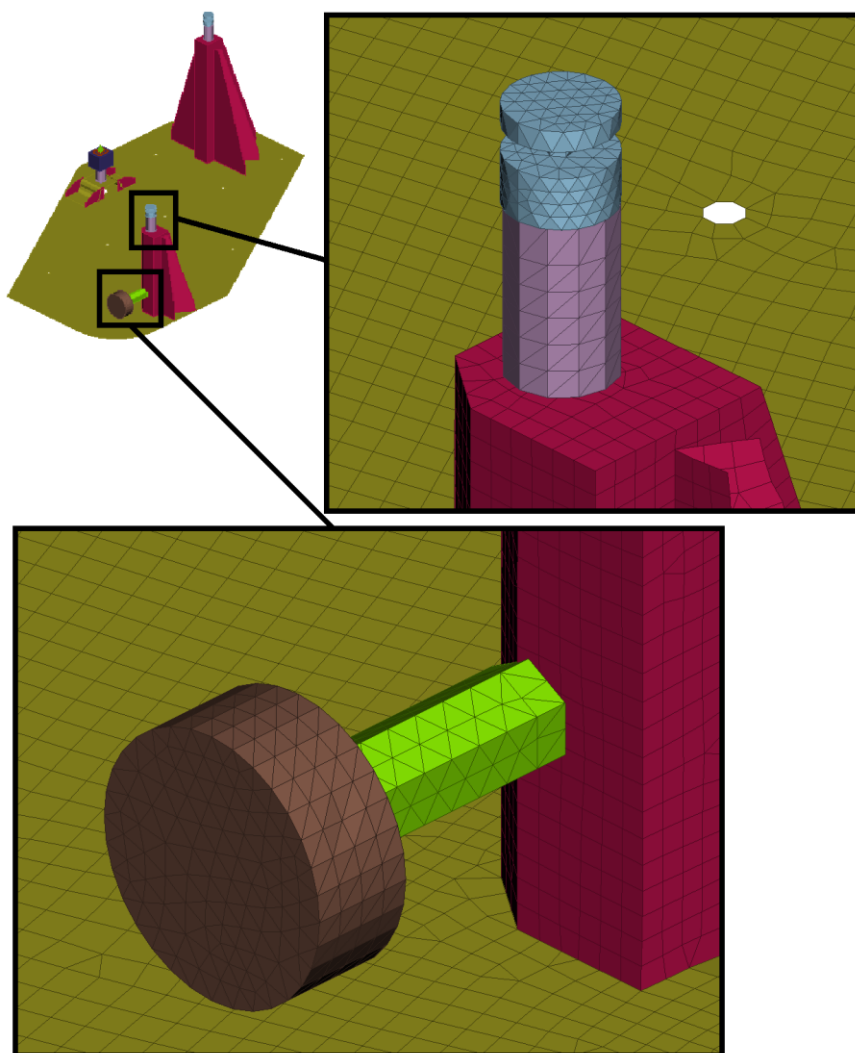
Vyhodnoceno dle kritérií LS-DYNA popsanych v kapitole 4.3.1.3. Minimální délka možného časového kroku nesmí být menší než 1×10^{-6} ms.

- **Minimální a maximální délka hrany**

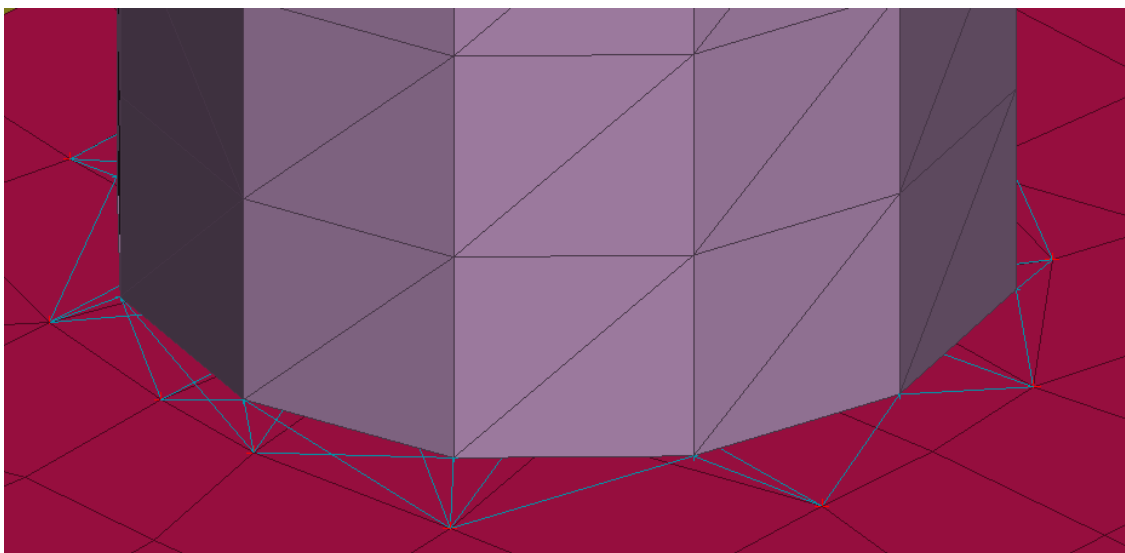
Žádná hrana elementu by neměla být menší než 1 mm a větší než 9 mm.

5.2.2 Popis okolí světlometu

Oblasti, které jsou přímo přichyceny k pouzdra světlometu (tenzometrické snímače) a oblast dorazu impaktoru byly také modelovány objemovými prvky. Výše popisované úchyty (obrázky 14 a 15) byly modelovány stejným způsobem. Detail je na obrázku 17. Na vnitřních plochách šroubu (světle modrá barva na obrázku 17) bylo použito opět ideální spojení kontaktem k úchytům pouzdra světlometu. Stejné spojení bylo použito i pro spojení šroubu s tenzometrickým snímačem (obrázek 17, světle modrá a fialová koaxiální válcovitá struktura). Tenzometrické snímače jsou nadále spojeny s již 2D strukturou přípravku, a to pomocí SPC prvků. Detail spoje je na obrázku 18. Analogickým způsobem je řešeno spojení dorazu impaktoru se strukturou přípravku.

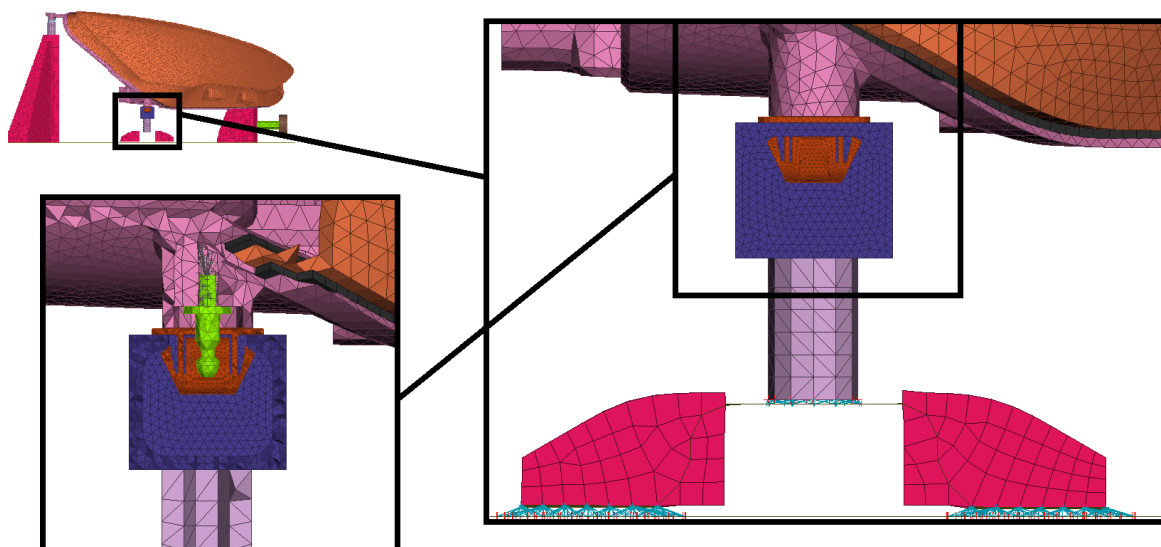


Obrázek 17 - Detaily uchycení světlometu a dorazu impaktoru



Obrázek 18 - SPC spojení objemových prvků snímáče a plošných prvků přípravku

Poslední, spodní úchyt je konstrukčně specifický. Pro lepší názornost je zobrazen na obrázku 19 i s detailem a detailem v řezu. Tento (světle zelený) čep je součástí světlometu a také byl zahrnut do experimentu. Jeho přítomnost je při průběhu nárazu naprosto zásadní, proto nemohl být zanedbán jako jiné části světlometu. Na obrázku 19 lze také vidět SPC spojení objemových a plošných prvků tak, jako u ostatních případů.

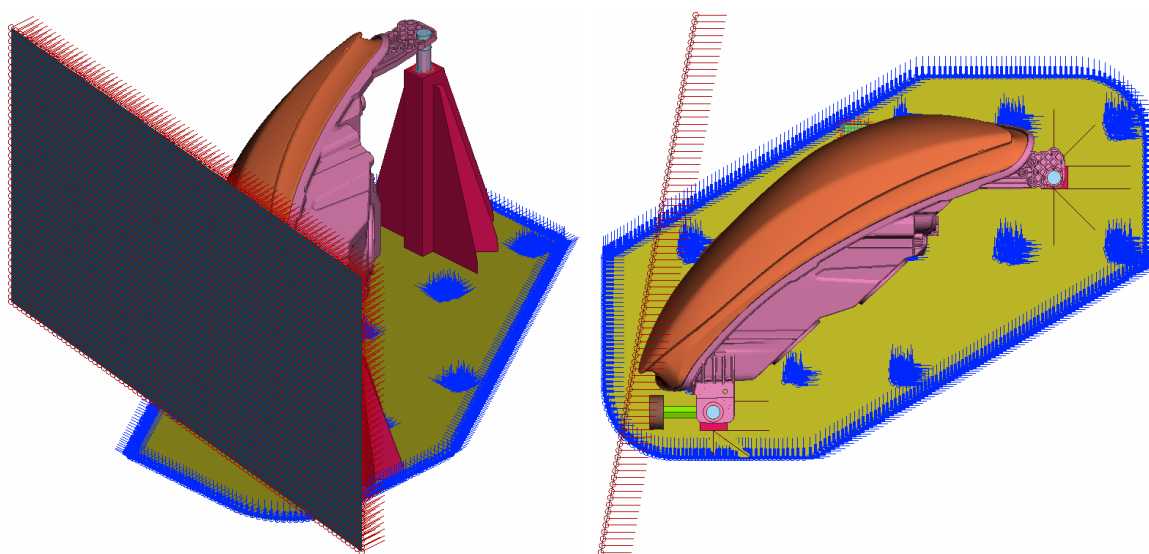


Obrázek 19 - Spodní úchyt s detaily

5.3 Okrajové a počáteční podmínky, kontakty

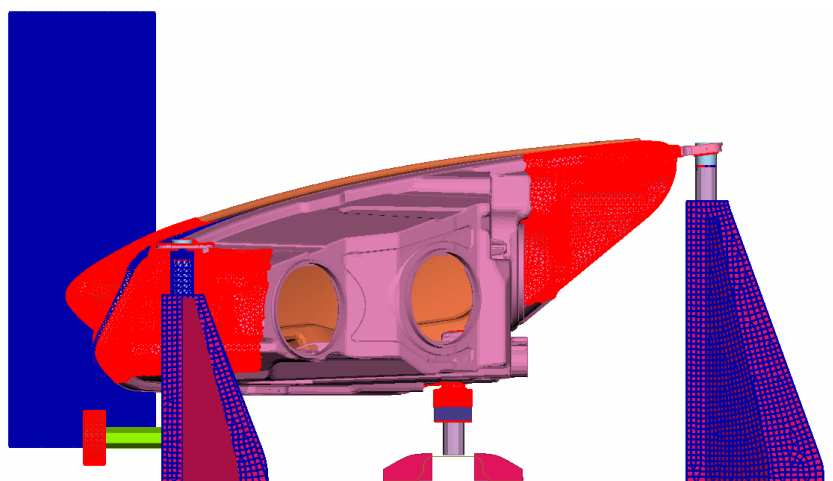
Okrajové podmínky jsou řešeny pomocí prvků SPC tak, jako u uchycení vzorku při reversním modelování v kapitole 4. Přípravek je uchycen po okrajích základové desky a v místech, kde je při experimentu přišroubován ke zkušebnímu stroji. Na obrázku 20 jsou SPC prvky zobrazeny modře na přípravku, který je vybarven zlatou barvou.

Počáteční podmínky jsou aplikovány na všechny uzly impaktoru, který je natočen podle specifikací firmy. Počáteční podmínka je definována jako počáteční rychlost v ideálně horizontálním směru. Rychlost byla nastavena na 7 km/h, což odpovídá 1,94 m/s. Na obrázku 20 jsou počáteční podmínky znázorněny červeně.



Obrázek 20 - Okrajové a počáteční podmínky

Kromě kontaktů, jenž jsou využívány pro spojování struktury (popsáno v předchozích podkapitolách) byly všechny kontakty řešeny automatickými kontakty s třením. Třecí koeficienty byly stanoveny dle zkušeností firmy. Takto bylo nastaveno celkem 15 kontaktů, a to v místech očekávaných střetů elementů. Pro názornost a stručnost jsou kontaktní plochy zobrazeny všechny najednou na celém modelu na obrázku 21.



Obrázek 21 - Názorné zobrazení ploch s automatickým kontaktem

5.4 Materiálové definice

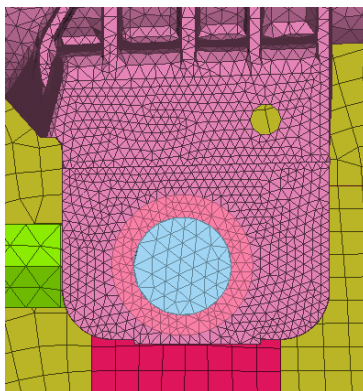
Materiál, kterým se zabývá diplomová práce (Polypropylen plněný 40% mastkem) je použit na celé pouzdro světlometu. Ostatní použité materiály jsou převzaty z materiálové databáze firmy. Přehled použitých materiálových modelů je v tabulce 5.

Komponenta	Materiál	Typ definice
Pouzdro světlometu	Polypropylen s 40% mastku	Elastoplastický s izotropním zpevněním, závislostí na rychlosti poměrné deformace a možným porušením materiálu
Krycí sklo	Polykarbonát	
Elementy lepidla	Uměle vytvořený model na základě měření	Ideálně elastický
Doraz impaktoru	Uměle vytvořený model	
Přípravek	Ocel	

Tabulka 5 - Přehled použitých materiálových modelů

Zvláštní pozornost je třeba věnovat spojení úchytů se šroubem. Spojení je provedeno svázaným kontaktem tak, jak bylo využito například u lepidla, což s sebou nese určitá omezení. K odtržení elementů v analýze dochází v přímém okolí kontaktu, což neodpovídá realitě. Jedno z inženýrských možných řešení (bez modelování předpětí) je predefinovat materiál v okolí kontaktu u elementů, u kterých nedojde k přerušení hned a propagace lomu bude realističtější. Detailní pohled na jedno ze dvou takových spojení je na obrázku 22. Elementy v okolí úchyty mají definovanou rozdílnou hranici poměrné deformace pro odmazání elementu než ostatní elementy (viz tabulka 4, hodnota EFFEPS). Hodnota zde byla ztrojnásobena. Je to daň za jednoduchost ideálního uchycení a do budoucna je zde prostor pro detailnější zpracování.

Ze zkušenosti je také známo, že ačkoliv v analýzách dochází k poruše materiálu v tlaku, v realitě se to při této aplikaci zásadně neděje. Proto musí být přidána další podmínka pro porušení elementu, a to nutná kladná poměrná objemová deformace pro vymazání elementu. Zde byla stanovena pro všechny elementy (pro celé pouzdro světlometu i okolí úchytů) na hodnotu 0,005, tedy 5% kladné poměrné objemové deformace. Obě podmínky musí být splněny zároveň, aby byl element vymazán, tedy došlo k jeho porušení.



Obrázek 22 - Předefinování kritérií pro vymazání elementu

5.5 Nastavení výpočtu

Délka simulovaného procesu je nastavena na 30 ms. Délka časového kroku je limitována minimální hodnotou, a to 1/10 počátečního časového kroku vyhodnoceného LS-DYNA. Modifikace časového kroku v průběhu výpočtu je nastavena tak, že pokud velikost tohoto kroku, založeného na velikosti elementu (viz 4.3.1.3) klesne pod hranici 2×10^{-4} ms, bude se během výpočtu přidávat hmotnost u těch elementů, které nesplní tuto podmínku. Z toho důvodu je nutné kontrolovat přírůstek hmotnosti v průběhu analýzy.

Přidaná hmotnost před začátkem výpočtu je u nejvýznamnějších komponent v tabulce 6.

Komponenta	Přidaná hmotnost [%]
Pouzdro světlometu	0,44
Krycí světlo	0,03
Okolí šroubů u úchyty	6,42
Čep	0,62
Přípravek	8,03

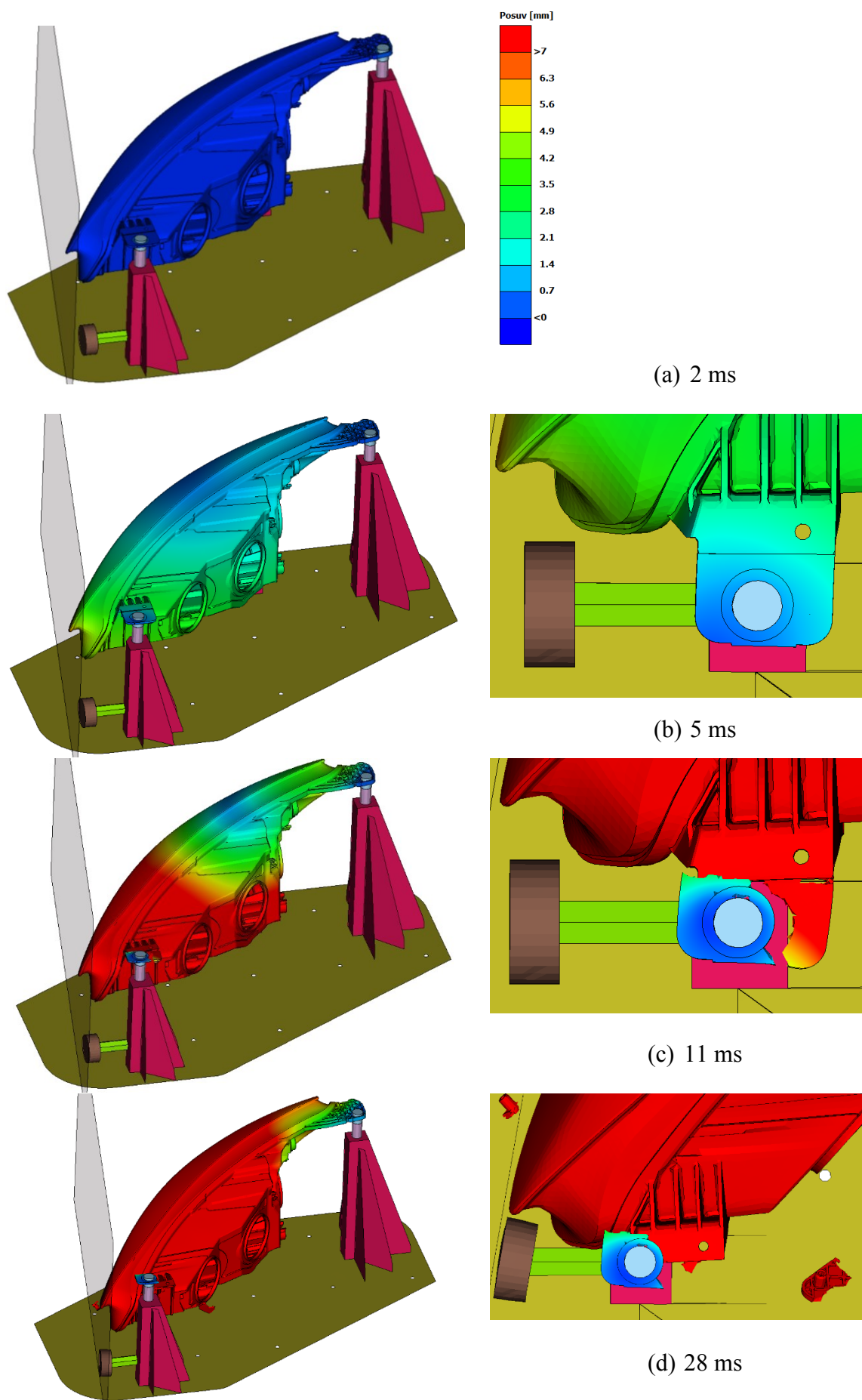
Tabulka 6 - Přidaná hmotnost do modelu

5.6 Výsledky výpočtu

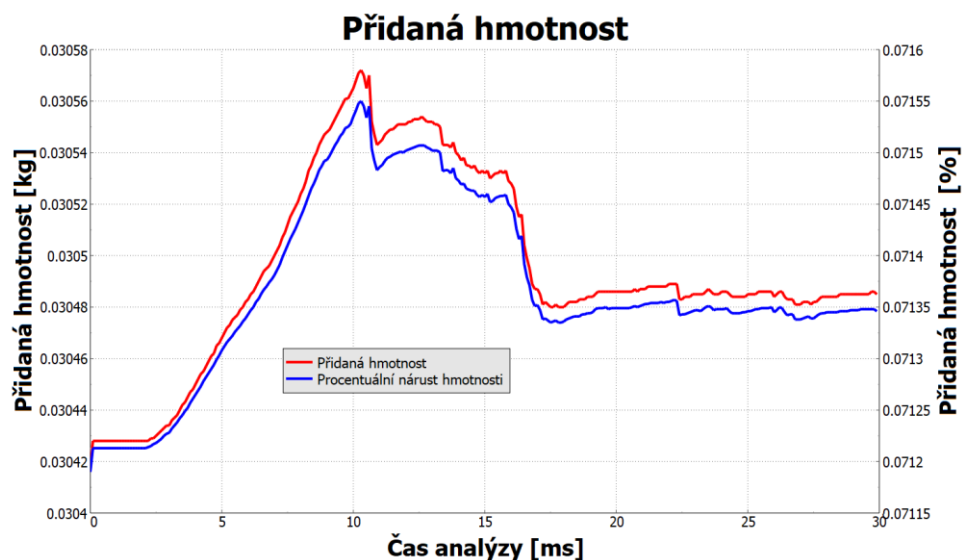
K prvotnímu kontaktu mezi impaktorem a krycím sklem světlometu dochází v druhé milisekundě časového průběhu simulace. K ulomení vnitřního úchyty dojde asi v 11 ms a u vnějšího úchyty nedojde k lomu vůbec. Validace simulace je založena na porovnání reakčních sil v úchytech. Toto bude provedeno v následující kapitole.

Jak bylo zmíněno v předchozí podkapitole, je nutné sledovat přírůstky hmotnosti v rámci škálování hmotnosti. Průběh celkové přidané hmotnosti do modelu je vidět na grafu 27 jak v kilogramech, tak v procentech vůči celému modelu. Přidaná hmotnost je naprosto zanedbatelná a neovlivňuje kinematiku úlohy. LS-DYNA uvádí předpokládanou délku výpočtu. Bez využití možnosti škálování hmotnosti je předpokládaná délka výpočtu s paralelním procesingem na dvou procesorových jádrech s hardwarovou konfigurací firemní výpočetní stanice stanovena na 48 hodin výpočetního času. S využitím škálování hmotnosti se předpokládaná délka výpočtu sníží na 8,42 hodiny výpočetního času. Jde tedy o výraznou úsporu.

Vizualizace simulace pomocí softwaru META je na obrázcích 23 v okamžicích 2 ms (první kontakt), 5 ms, 11 ms (lom vnitřního úchyty), 28 ms (u konce analýzy). Barevná škála popisuje magnitudu posuvů uzlů a je stejná u všech obrázků. Detailněji je také zobrazen vnitřní úchyt v půdorysu.



Obrázek 23 - Vizualizace posuvů simulace



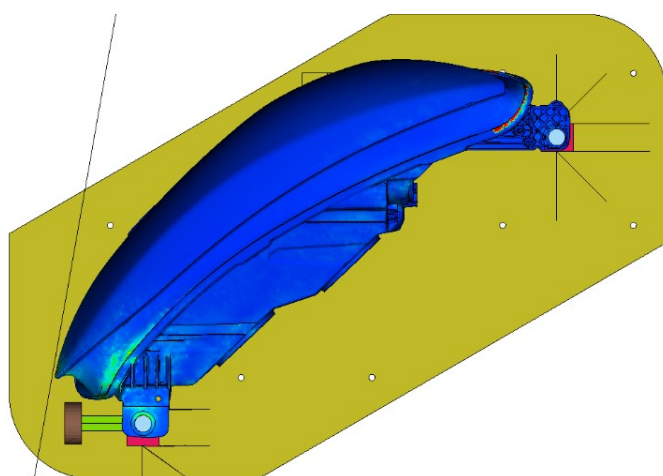
Graf 13 - Časový průběh škálování hmotnosti

Rozložení poměrných deformací podle hypotézy Von Mises je zobrazeno na obrázcích 24. Lze vidět nedokonalost spojení pouzdra světloometu a krycího skla pomocí ideálního kontaktu a elementů lepidla. Jde o problém nedokonalé sítě v oblasti poblíž vnějšího úchyty. Na vnitřním úchyty lze vidět nedokonalost kontaktu a využití inženýrského řešení hodnoty mazání elementu (viz podkapitola 5.4). Uzly v ideálním kontaktu jsou zafixovány, což neodpovídá realitě. Propagace lomu je tímto lehce ovlivněna a je nutno brát tuto skutečnost v potaz.

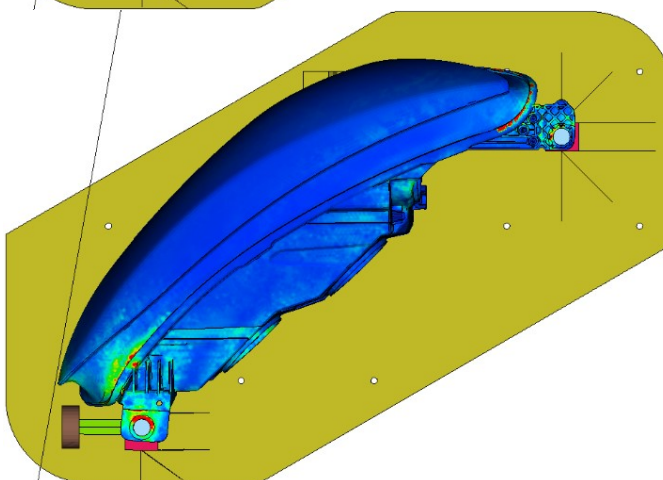
Na obrázcích 25 je vidět rychlost této deformace (opět přepočtenou podle Von Mises hypotézy). V momentě těsně před lomem lze sledovat, že většina oblasti v okolí vnitřního úchyty vykazuje rychlost poměrné deformace vyšší než $0,551 \text{ ms}^{-1}$, což znamená, že se již materiál v této oblasti chová podle nejvyšší křivky zpevnění (viz graf 17, resp. 21).

Rozložení napětí podle hypotézy Von Mises je poté zobrazeno na obrázcích 26. Zvýšené napětí je přirozeně v okolí úchyty. Odstavec výše také naznačuje, že definice závislosti na rychlosti poměrné deformace napomáhá zvýšení napětí v okolí vnitřního úchyty.

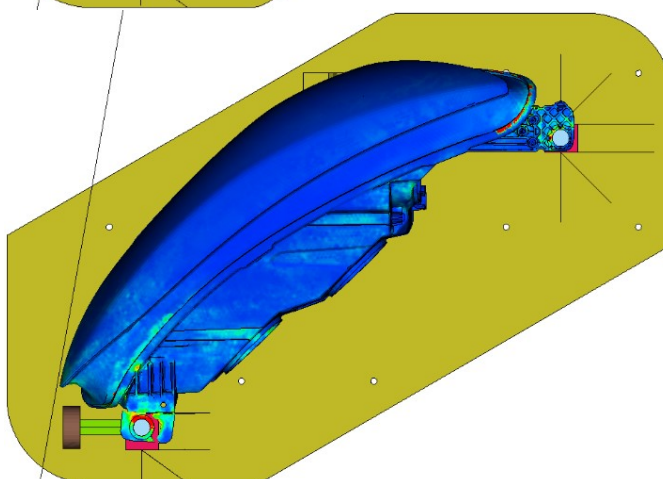
V podkapitole 5.4 byla popsána modifikace materiálového modelu pro přesnější naladění simulace lomu v materiálu. Bylo zmíněno, že materiál by měl být porušován výhradně v tahu, čemuž pomohla podmínka, že lom materiálu je podmíněn alespoň 5% kladnou objemovou poměrnou deformací. Funkčnost tohoto řešení lze vidět na obrázcích 27, kde je v okolí lomu úchyty vykresleno napětí podle Von Mises hypotézy se znaménkem, odpovídající největší hodnotě hlavního napětí, tedy kladně v případě tahu (červená), záporně v případě tlaku (modrá). Napětí je vykresleno těsně před lomem, tedy v časovém kroku 10 ms a těsně po lom, v časovém kroku 11 ms.



(a) 5 ms

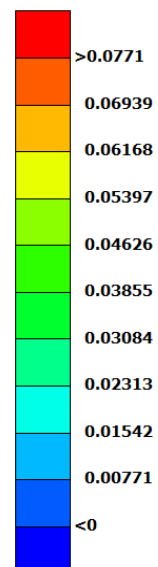


(b) 10 ms

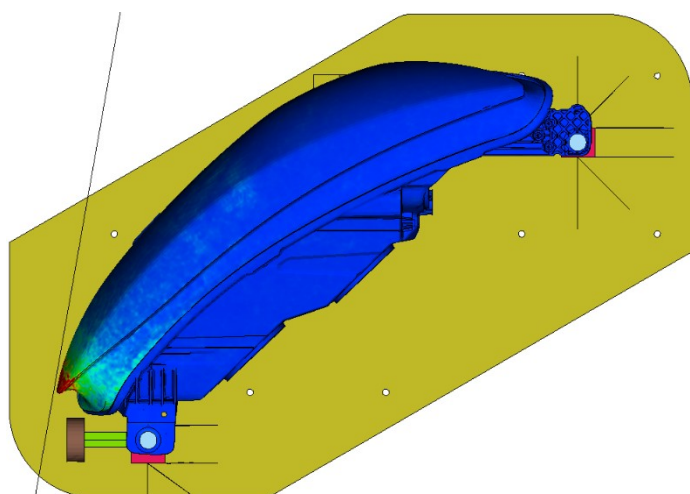


(c) 11 ms

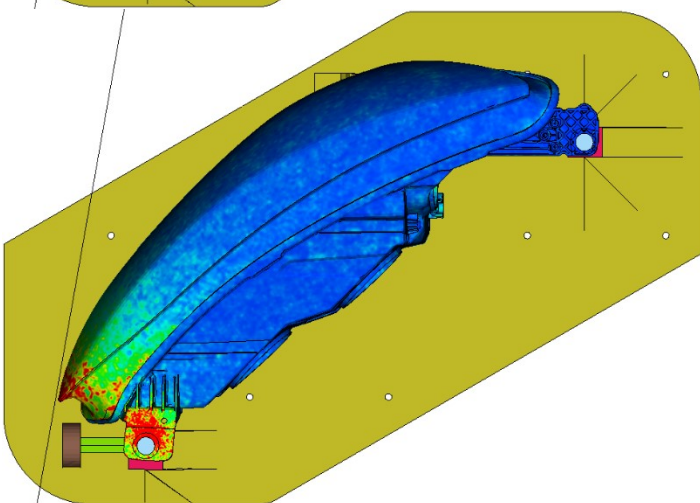
Poměrná deformace Von Mises [-]



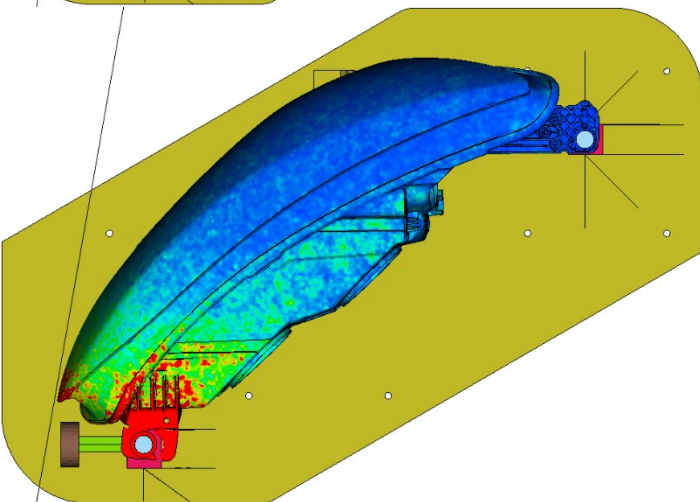
Obrázek 24 - Rozložení poměrných deformací



(a) 5 ms

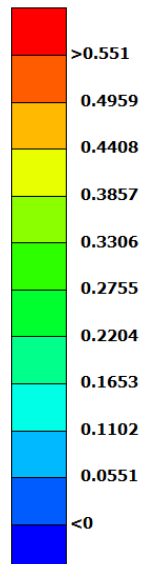


(b) 10 ms

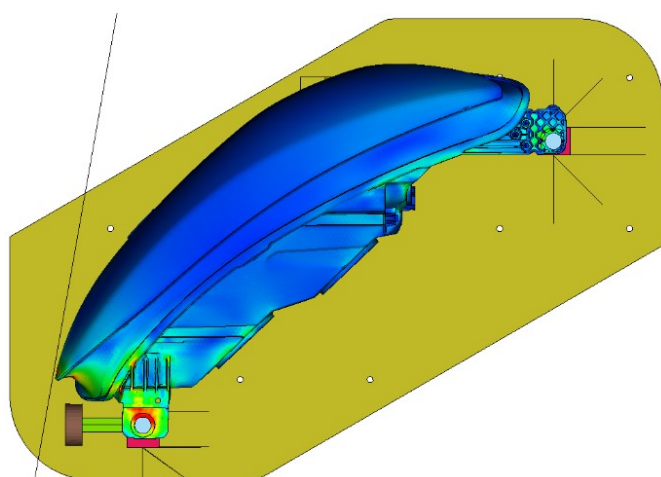


(c) 11 ms

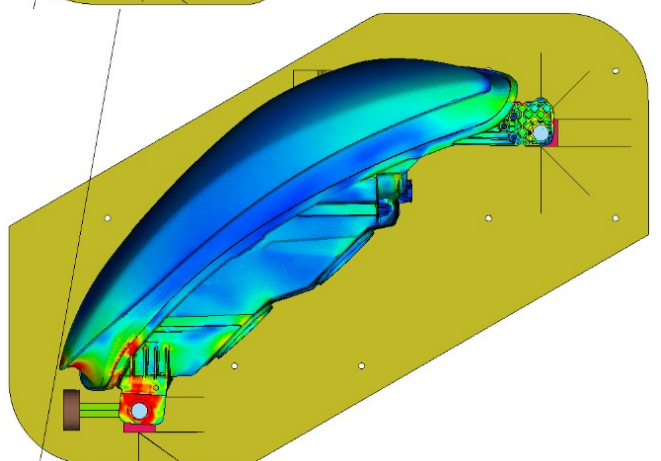
Rychlost deformace [1/ms]



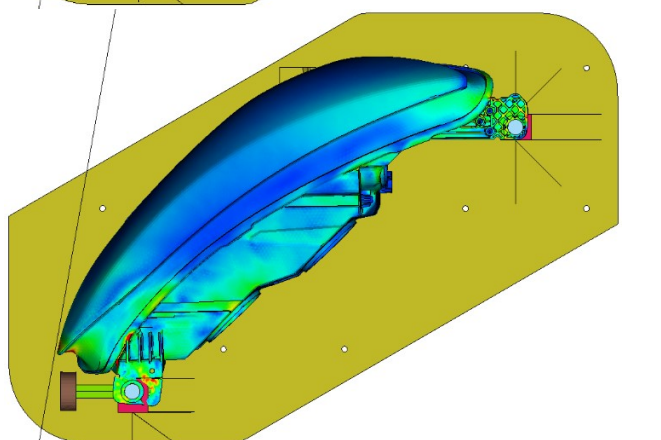
Obrázek 25 - Rozložení rychlosti poměrné deformace



(a) 5 ms

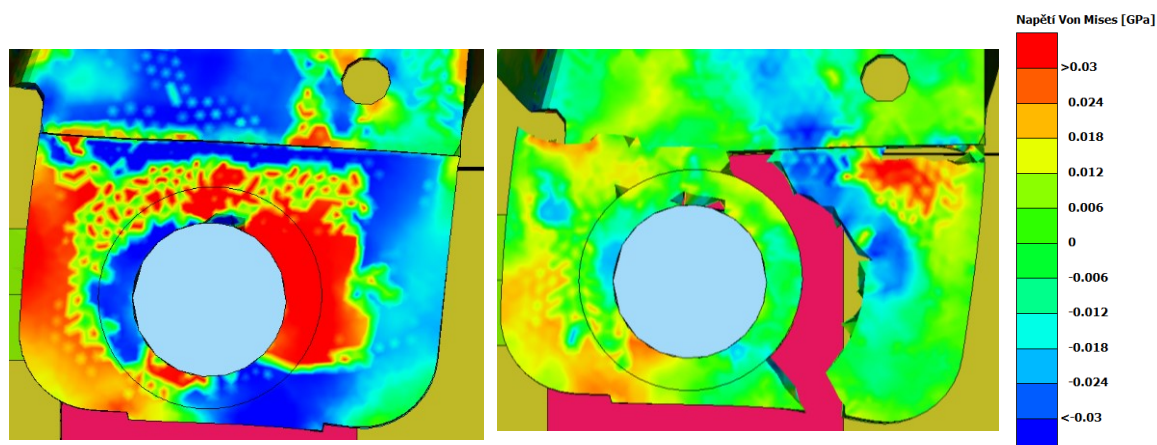


(b) 10 ms



(c) 11 ms

Obrázek 26 - Rozložení Von Mises napětí



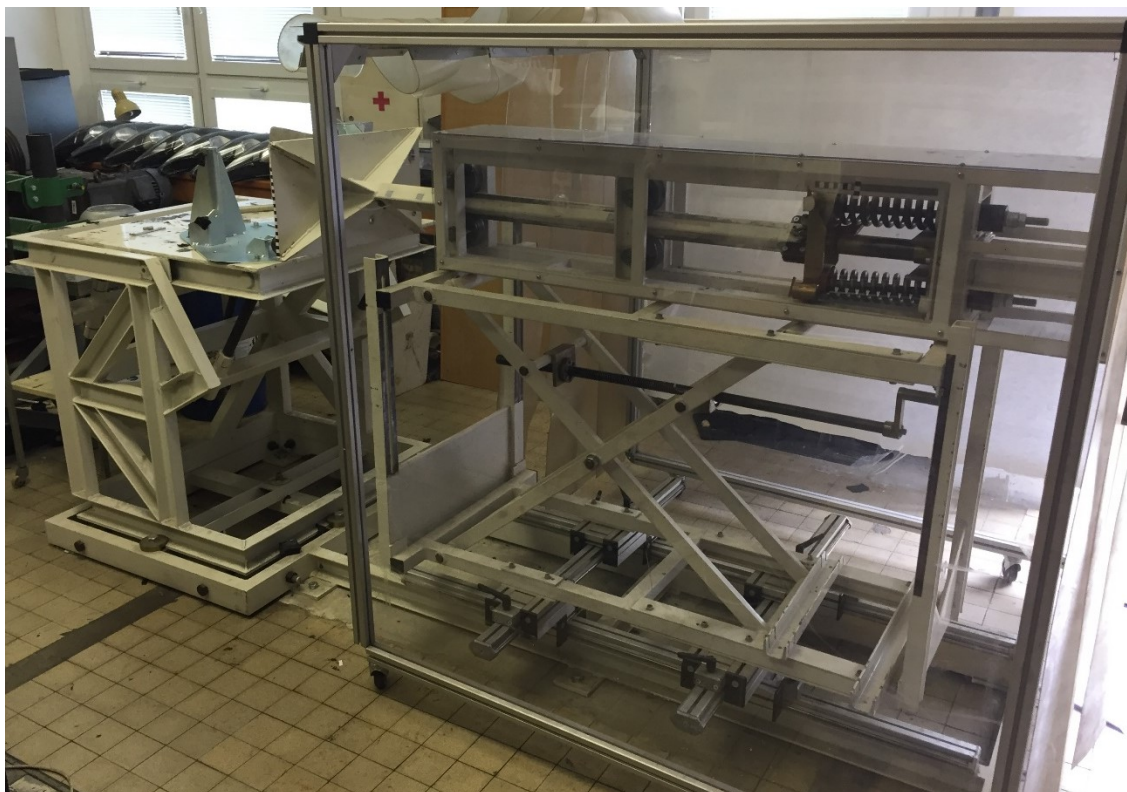
Obrázek 27 - Rozlišení tahového (+) a tlakového (-) Von Mises napětí a jejich vliv na lom materiálu

6 Srovnání simulací s experimentem

Experimentální měření bylo provedeno v laboratořích VŠB – Technické univerzity v Ostravě. Otestováno bylo celkem osm světlometů. Čtyři bez vloženého čepu a čtyři ve variantě s čepem (viz obrázek 19). Varianta s čepem byla simulována. Data pouze ze dvou pokusů byla hodnocena v porovnání sil, jelikož u zbývajících dvou došlo k vylomení čepu nebo ke ztrátě dat z důvodu chyby při zapisování.

6.1 Popis experimentu

Stroj na vystřelení impaktoru je vidět na obrázku 28. Impaktor je vystřelen v horizontálním směru na světlomet. Energie je mu dodána mechanicky, direkční silou pružiny, která je pomocí pohybového šroubu stlačena podle požadované rychlosti v době nárazu impaktoru. Světlomet je upevněn v přípravku stejné geometrie jako v simulaci. Světlomet je v přípravku upevněn na třech úchytech. Na dvou pomocí šroubu a na jednom pomocí čepu. Pod jednotlivými šrouby jsou umístěny trojosé tenzometrické snímače síly o jmenovitém rozsahu (0 - 5) kN. Tenzometry jsou ve snímačích zapojeny do plného můstku tak, že kompenzují teplotní zatížení. Upevnění světlometu je na obrázku 29. Celý proces byl natáčen vysokorychlostní kamerou.



Obrázek 28 - Stroj na vystřelení impaktoru



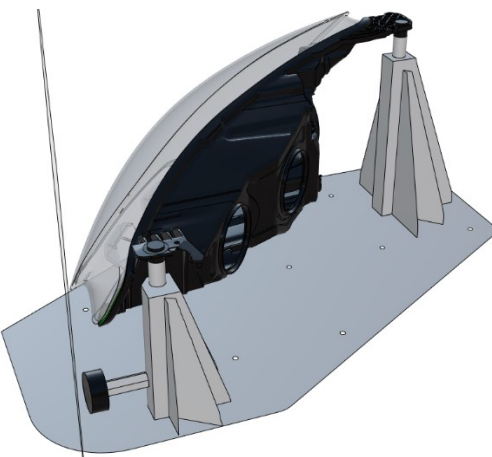
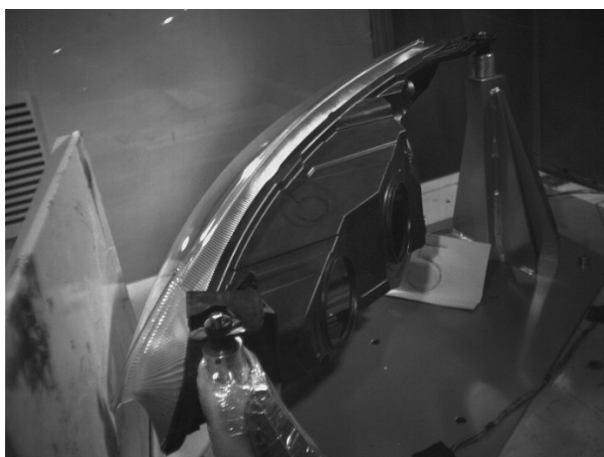
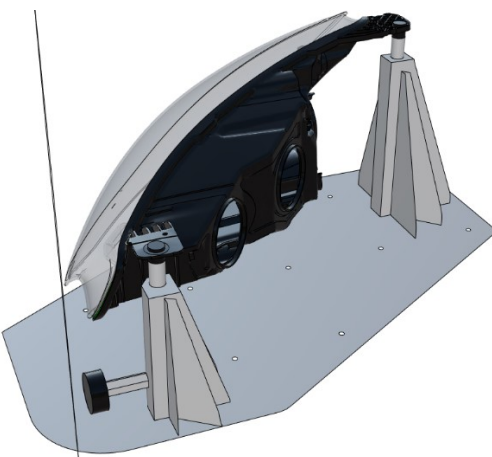
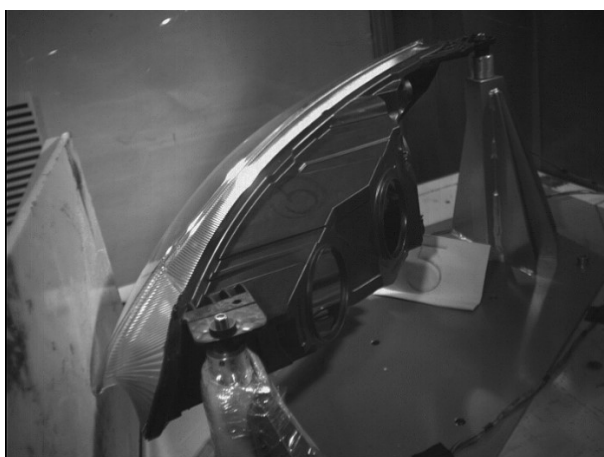
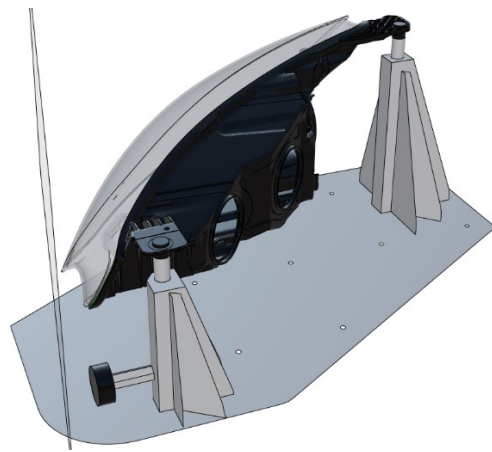
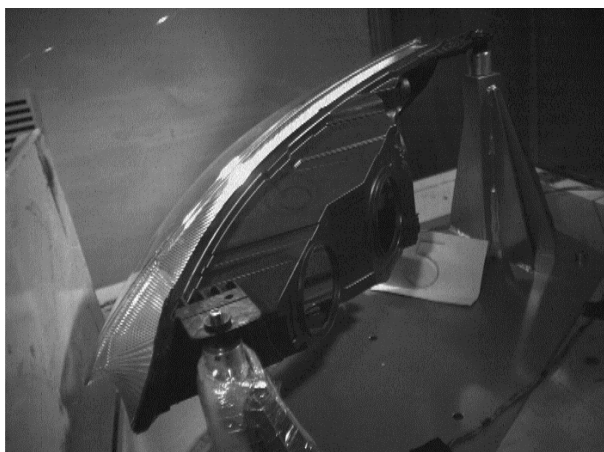
Obrázek 29 - Upevnění světlometu v přípravku

6.2 Srovnání výsledků

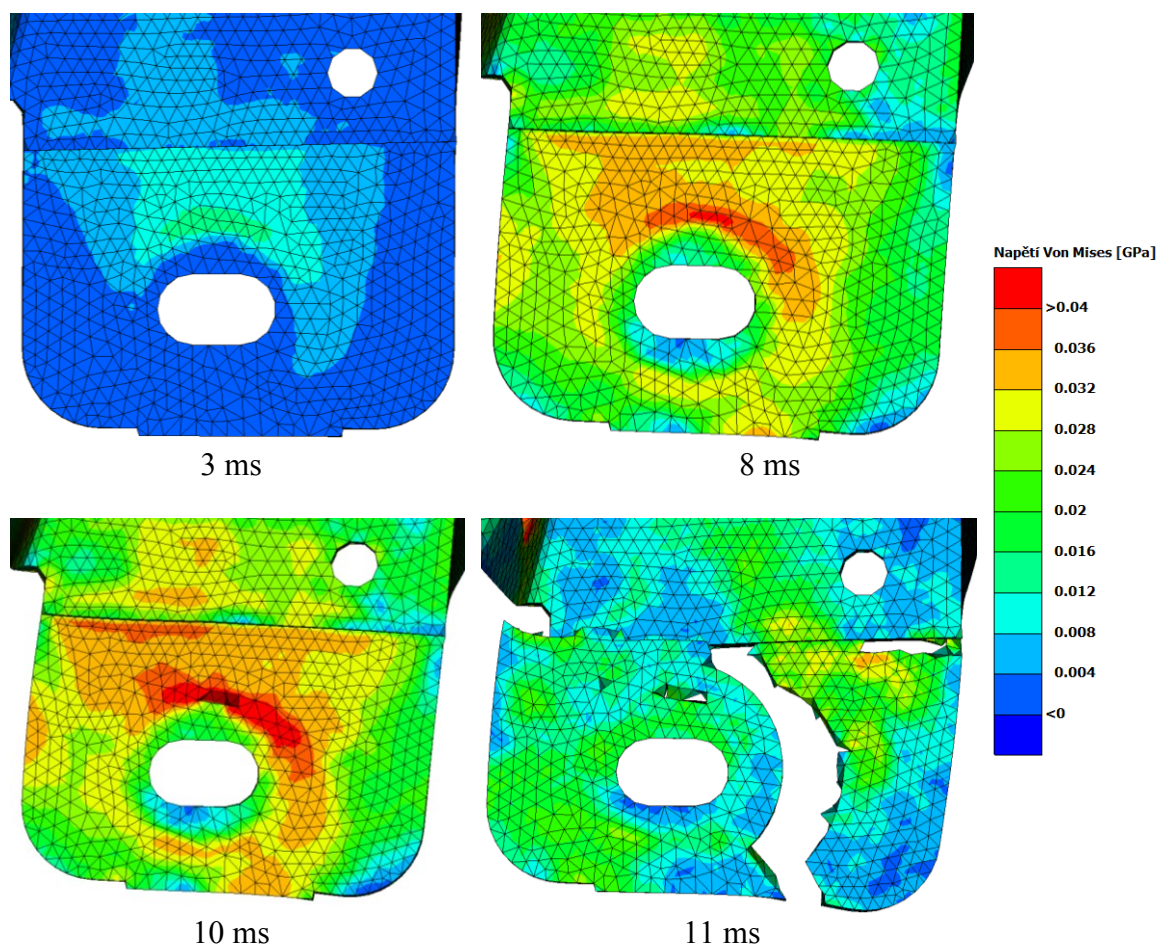
Vizuální porovnání celkového průběhu simulace s experimentem je možné na obrázcích 30. Lze vidět, že podobně jako v simulaci nedojde k lomu vnějšího úchyty a celý světlomet se pohybuje a deformuje hlavně v kombinaci směrů letu impaktoru a gravitačního zrychlení.

Chování materiálu v okolí vnitřního úchyty lze sledovat i s rozložením napětí na obrázcích 31. Napětí podle hypotézy Von Mises dosahuje před lomem řádově 40 MPa. Materiál se v okamžiku před lomem chová podle křivek pro nejvyšší rychlost poměrné deformace, jak je zřejmé z obrázku 25b. Maximální hodnota vyznačená červeně symbolizuje překročení limitní hodnoty nutné pro tuto křivku. Během experimentu při prostém tahu bylo zjištěno maximální napětí před lomem při nejvyšší testované rychlosti (40 – 50) MPa (viz graf 2). Jelikož jde o víceosý napěťový stav a v tahové zkoušce se stav blíží jednoosému, dá se říci, že hodnoty napětí při lomu odpovídají.

Je zřejmé, že během propagace lomu je efektivně využit uměle vytvořený koncentrátor napětí, který má směřovat lom. Pro porovnání prasknutí jsou přiloženy obrázky 32, fotky z experimentů. Při srovnání s obrázkem 31 jde vidět, že propagace lomu byla lehce ovlivněna způsobem definice spojení materiálu se šroubem (viz podkapitola 5.4).



Obrázek 30 - Vizuální porovnání experimentu a simulace



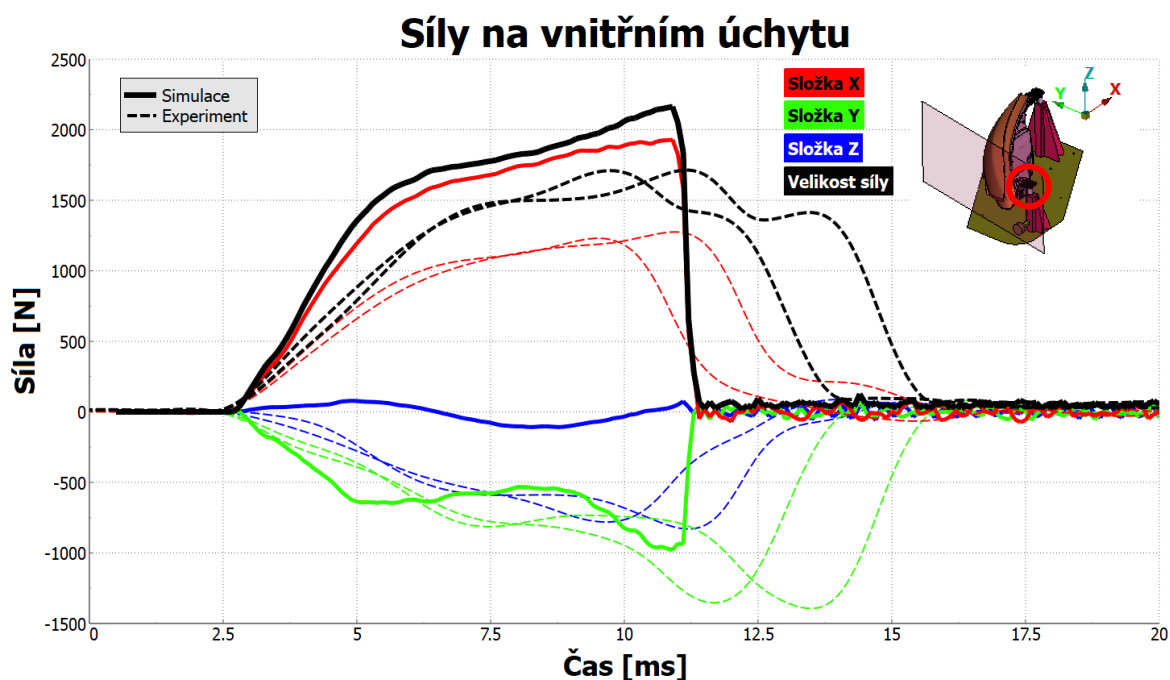
Obrázek 31 - Chování materiálu okolo vnitřního úchyty



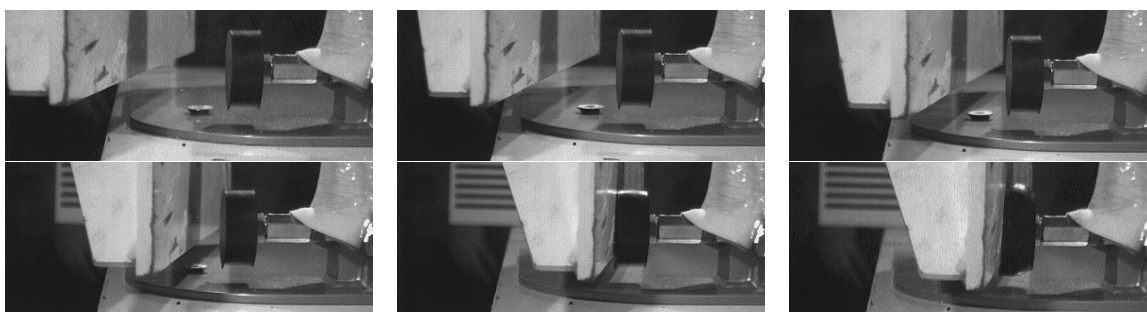
Obrázek 32 - Lom vnitřního úchyty při experimentu

Dalším krokem validace simulace je porovnání sil a jejich složek na vnitřním a vnějším úchytu, jenž byly měřeny tenzometrickými silovými snímači. Graf 28 zobrazuje časový průběh jednotlivých složek sil včetně jejich velikostí. Experimentální data jsou posunuta v relativní časové ose tak, aby se začátek zatěžování shodoval se simulací. Je vidět, že v simulaci dojde k lomu vnitřního úchytu dříve, což může být způsobeno lehkým natočením úchytů v šroubech.

Celková velikost sil je v simulaci vyšší než v experimentu. Na grafu lze vidět, že nejvyšší složka síly v simulaci je, očekávaně, ve směru letu impaktoru. V experimentu tato složka není tak vysoká. Naopak je však v experimentu mnohem větší složka ve směru Z, tedy vertikálním. Složky ve směru Y jsou hodnotově stejně velké. Tato rozdílnost ve směru sil se dá vysvětlit ideální dráhou letu impaktoru v simulaci. Impaktor v simulaci letí pouze v ose X. Ačkoliv je zahrnuto působení gravitačních sil na impaktor, počáteční vzdálenost není dostatečně daleko, aby mohla být dráha letu ovlivněna. Kdežto u experimentu letí impaktor volně a delší vzdálenost. Nedopadne tedy v ideálním směru tak, jako v simulaci. Pro validaci této myšlenky byl dopad impaktoru na doraz snímán vysokorychlostní kamerou. Z obrázků 33 jde na první pohled vidět, že impaktor klesá a nedopadá na doraz ideálně.



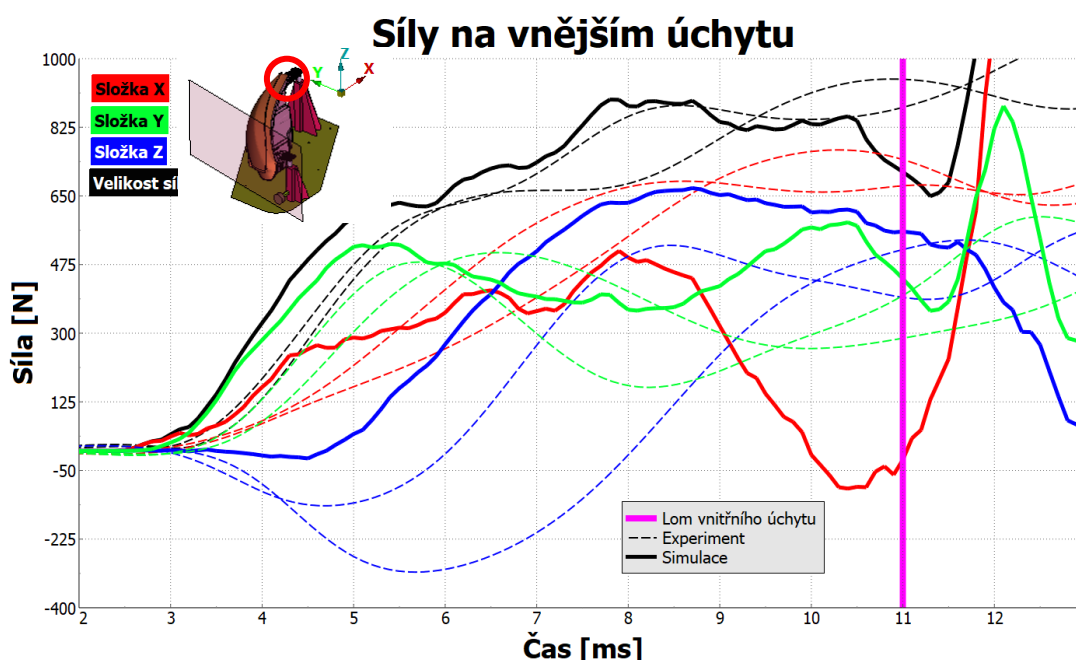
Graf 14 - Časový průběh složek sil na vnitřním úchytu



Obrázek 33 - Snímky dopadu impaktoru na doraz

Porovnání složek sil na vnějším úchytu je náročnější než na vnitřním. V průběhu testu dojde k ulomení vnitřního úchytu, což v simulaci a v experimentu nenastává ve stejný čas. Po ulomení vnitřního úchytu se zásadně mění charakter soustavy. Vzhledem k tomu, že v okamžiku ulomení úchytu v simulaci ještě k ulomení v experimentu nedochází, jsou v tento časový okamžik data neporovnatelná. Proto je srovnání sil relevantní pouze po první utržení, a to v simulaci v čase 11 ms. Navíc síly zjišťované na vnějším úchytu jsou přeneseny celou strukturou pouzdra světloometu. Jsou tedy ovlivněny celou geometrií i materiálem. Je mnohem náročnější stanovit závěry z těchto naměřených/nasimulovaných dat.

V grafu 29 je moment lomu vnitřního úchytu v simulaci označen tučnou růžovou přímkou. Velikost sil tady odpovídá více experimentu více než u vnitřního úchytu. Také složky Y, stejně jako u vnitřního úchytu, hodnotově odpovídají dobře. Složka X ve směru letu impaktoru má shodné tendence jako při experimentu, avšak okolo 9 ms dochází k odchýlení od experimentu. V tomto okamžiku dochází k lehké odchylce od experimentu i u složky Y. Vertikální složka Z je na začátku průběhu nadhodnocena a nesleduje trend experimentu, avšak poté nabývá přibližně stejného průběhu.



Graf 15 - Časový průběh složek sil na vnějším úchytu

7 Závěr

Tato práce vznikla na základě požadavků firmy Varroc Lighting Systems, která se zabývá výrobou i kompletním vývojem automobilové světelné techniky. V úvodu práce je zmíněno zdůvodnění nutnosti řešení tohoto tématu.

Druhá kapitola se věnuje teoretické části práce. Je zde zanesen do kontextu typ materiálu, na něž tato práce konkrétně cílí, polypropylen plněný mastkem (PP-TD40). V této kapitole je také vysvětlen původ časově závislé poměrné deformace u polymerů, což je jedna ze zásadních mechanických vlastností materiálu, která musí být brána v úvahu při modelování rychlých dějů (crash testů). Na konci kapitoly jsou nastíněny některé modely polymerů, které ovšem v této, prakticky zaměřené práci, nakonec nebyly využity pro svou značnou komplexnost a vysoké požadavky na experimentální data.

Experimentálnímu zjišťování charakteristik materiálu se věnuje třetí kapitola. Nejprve je rozebrán a zdůvodněn proces volby vhodného experimentu. Ze zúženého výběru tří experimentů (Konvenční tahová zkouška, Vysokorychlostní tahová zkouška a Hopkinsonova dělená tyč) byly provedeny dva experimenty. První, konvenční tahová zkouška, která nedokázala popsat materiál při dostatečné rychlosti poměrné deformace. Bylo díky ní však zjištěno, že při nejnižší testované rychlosti zatěžování dochází k tvorbě „křejzů“ a je tedy nutné si tento jev uvědomit při vyhodnocování zkoušek. Druhý provedený experiment byla vysokorychlostní tahová zkouška. Ta byla provedena externí firmou. Experimentálně zjištěná data jsou ovlivněna kmitáním testovacího stroje, a tak je nutné tato data upravit do vhodné podoby. Otestovány byly tři způsoby úpravy dat. Každý z nich nakonec vyžadoval nutný manuální zásah. Využitý způsob je v práci popsán detailněji.

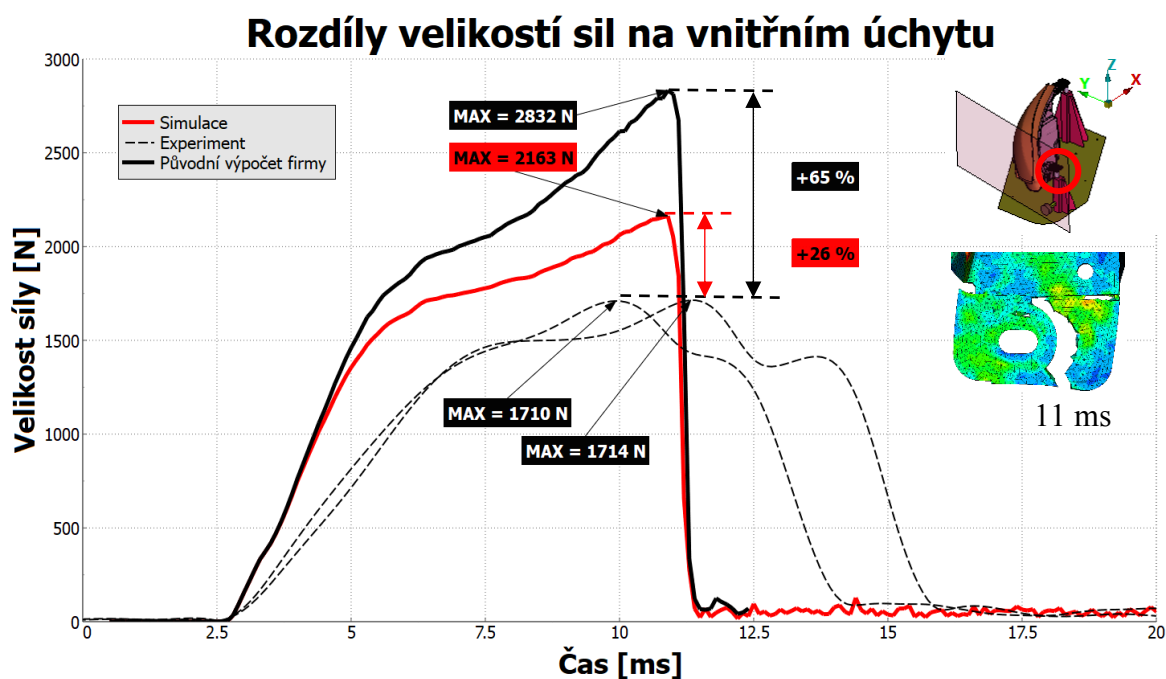
Pro tvorbu materiálového modelu pro LS-DYNA byl ve čtvrté kapitole vybrán model popisující plastické chování po částech lineárně. Již vyhodnocená materiálová data z předchozí kapitoly byla přizpůsobena tomuto modelu. Po popsání dvou možných přístupů k určení meze kluzu byla rozdělena elastická a plastická část chování materiálu. Pro tento typ materiálového modelu je nutné, aby vstupní napětově deformační křivky byly definovány za konstantní rychlosti poměrné deformace, což v experimentu nebylo splněno. Proto byl využit postup přepočtu křivek, avšak vstupní data nebyla dostatečně kvalitní. Došlo tedy k nutnosti zanedbat tento fakt a rychlost poměrné deformace stanovit jako konstantu na základě průměrné hodnoty v plastické oblasti. Toto vše bylo nutné pro následné reversní modelování. Experiment byl modelován explicitní metodou, jejíž základy byly popsány. Byla vytvořena geometrie, konečnoprvková síť, definovány okrajové a počáteční podmínky a byly provedeny 3 simulace v rychlostech stejných jako u původního experimentu. Po diskuzi faktorů ovlivňujících řešení byly simulace vyhodnoceny. Definovaný materiálový model v simulaci vykazoval, v rámci použitelnosti, dobrou shodu s experimentálními daty. Jako klíčová se ukázala viskoplastická formulace efektů rychlosti poměrné deformace.

Tento materiálový model byl poté otestován při simulaci crash testu reálného světlometu. V páté kapitole byla opět popsána příprava výpočtu a přiblížena materiálová definice jednotlivých materiálů. Materiálový model pro PP-TD40 (jímž bylo modelováno pouzdro světlometu) musel být modifikován. Vedle původního kritéria mazání elementů, založeného na maximální poměrné deformaci, bylo přidáno kritérium pro nutnou kladnou poměrnou objemovou deformaci. Díky tomuto opatření nedochází v simulaci k mazání

elementů v tlaku. Bylo také nutné předefinovat materiálovou definici pro elementy v těsné blízkosti ideálního spojení úchytu se šrouby, což snížilo ovlivnění průběhu lomu tímto kontaktem. Získané výsledky byly okomentovány a byla zkontrolována velikost přidané hmotnosti do modelu v průběhu simulace. Ukázalo se, že rychlost poměrné deformace v některých částech modelu (vnitřní úchyt před lomem) přesahuje nejvyšší hodnotu, pro kterou byla definována napěťově deformační křivka. Při dalším zvyšování rychlosti poměrné deformace již materiál není ovlivněn a je popsán stejnou, nejvyšší křivkou.

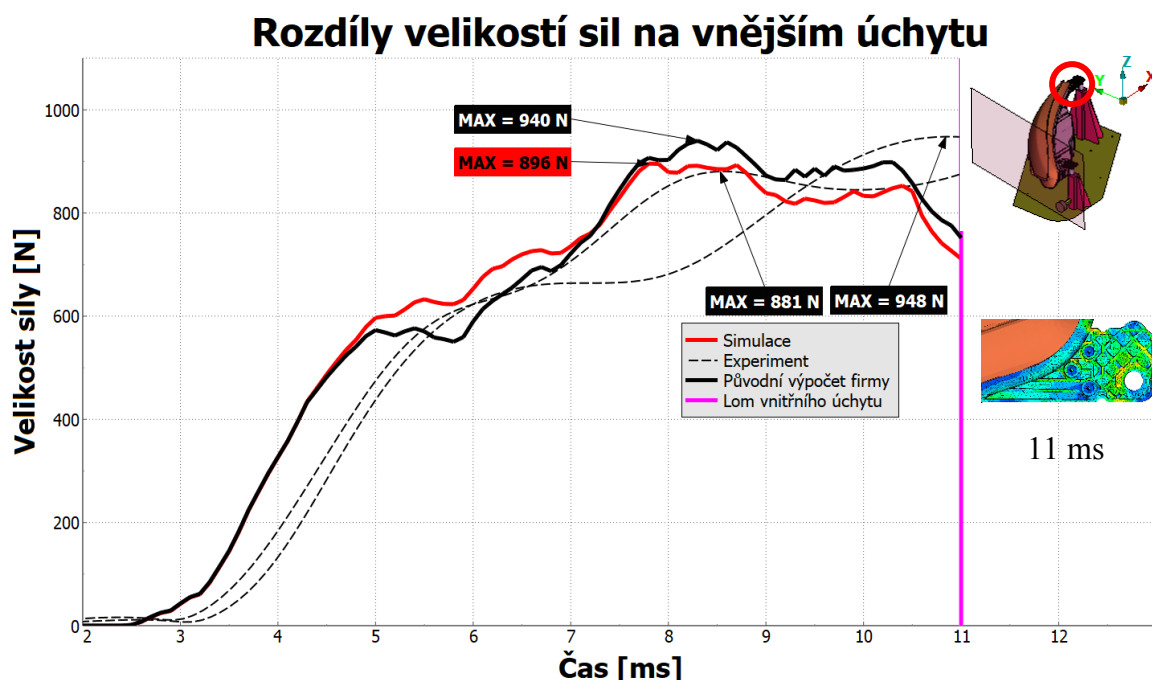
Celá simulace byla ověřena experimentem, který je popsán v šesté kapitole. Data z experimentu měla podobu záznamů vysokorychlostní kamery a průběhů složek sil snímaných tenzometrickými silovými snímači v úchytech světloometu. Výsledky byly se simulací porovnány nejprve vizuálně. Porovnáván byl pohyb celého světloometu a tvar lomu na vnitřním úchyty. Srovnání ukázalo velice dobrou shodu simulace s experimentem. Druhá část srovnání se věnovala složkám sil na úchytech. Byly popsány a částečně zdůvodněny rozdíly v jednotlivých silových složkách. Jako směrodatná bude pro vyhodnocení shody brána magnituda sil na obou úchytech.

Rozdíl maxima velikostí sil je 451 N, což odpovídá 26 %. Pro srovnání, původní materiálový model měl odchylku 1120 N, 65 % maxima experimentu. V případě vypočtení rozdílu křivek a jeho zprůměrování lze dojít k průměrné hodnotě rozdílu 365 N. U původního materiálového modelu je průměrný rozdíl křivek 666 N. To odpovídá 26, resp. 65 % velikosti maxima experimentu. Vše za předpokladu posuzování do doby lomu. Zobrazeno na grafu 30.



Graf 16 - Rozdíly velikostí sil na vnitřním úchyty

Na vnějším chytu musí být hodnoty posuzovány pouze do času 11 ms. V tomto čase dochází k lomu vnitřního úchytu a následné průběhy jsou poté neporovnatelné. Maxima u simulací i experimentů dosahují srovnatelných hodnot. Stejně tak dosahují srovnatelných hodnot rozdíly mezi průběhy velikosti sil v simulacích a experimentech. Odchyłky nepřesahují 10 %. Toto je graficky zobrazeno na grafu 31.



Graf 17 - Rozdíly velikostí sil na vnějším úchytu

Výsledky jsou shrnuty v tabulce 7. Vzhledem k velkému zjednodušení definice materiálu, hardwarovému omezení u výpočtu a s přihlédnutím k faktu, že samotný experiment nese spoustu nepřesností, vykazují výsledky výbornou shodu s experimenty. Jde o prozatím nej přesnější výsledky v nastavení tohoto materiálového modelu pro rychlé děje, kterých bylo ve firmě dosaženo.

		Experiment průměr	Původní model		Nový model	
Vnitřní úchyt	Maximum	1712 N	2832 N	+65 %	2163 N	+26 %
	Průměrný rozdíl v průběhu křivek		+666 N	+39 %	+365 N	+21 %
Vnější úchyt	Maximum	915N	940 N	+3 %	896 N	-5 %
	Průměrný rozdíl v průběhu křivek		76 N	+8 %	83 N	+9 %

Tabulka 7 - Shrnutí srovnání výsledků simulace a experimentu

U maximální velikosti síly na vnitřním úchytu došlo k přiblížení k experimentu o 39 %. V případě průměrného rozdílu (zachycujícího celý průběh) došlo ke zlepšení o 18 %. Na vnějším úchytu jsou výsledky srovnatelné. Toto závěrečné shrnutí je v tabulce 8.

		Zpřesnění výsledku	
Vnitřní úchyt	Maximum	39 %	Výrazné zpřesnění
	Průměrný rozdíl v průběhu křivek	18 %	Zpřesnění
Vnější úchyt	Maximum	-2 %	Srovnatelné
	Průměrný rozdíl v průběhu křivek	-1 %	Srovnatelné

Tabulka 8 – Závěr

7.1 Doporučení

Vzhledem k výlučnému duševnímu vlastnictví dílčích výsledků práce podléhá část této kapitoly utajení. Pro případ kontroly je plné znění práce uloženo na Katedře aplikované mechaniky.

Dalším prostorem pro zlepšení je ve variaci materiálových modelů. Ačkoliv je využívaný materiálový model hojně používán v praxi, software LS-DYNA nabízí další možnosti modelování termoplastů, které nebyly otestovány.

Výběr materiálového modelu je také spjat s potenciální nutností volby meze kluzu materiálu. Mohlo by být přínosem provést experiment zmíněný v podkapitole 4.2.1 případně využít některý z materiálových modelů, jenž nevyžaduje volbu meze kluzu.

Při modelování celého světloometu a sledování propagace potenciálního lomu v úchytech by bylo vhodné vytvoření detailnější sítě vzhledem k tloušťce materiálu. Prezentovaná konečno-prvková síť je kompromisem mezi kvalitou výsledků a délkou výpočtu.

Další prostor pro zlepšení výsledků je jednoznačně v reálnějším popisu přišroubování úchytů světloometu. Pokud by se podařilo zachytit tuto problematiku realističtěji (s možným lehkým prokluzem a s předpětím), bylo by možno ve výsledcích simulace sledovat větší poddajnost struktury, mohla by se snížit maximální hodnota velikosti síly na vnitřním úchytu a k lomu by mohlo dojít později. Potom by se také dal validovat delší časový úsek průběhu sil na vnějším úchytu.

Lepší shody v orientaci směrů sil na úchytech by bylo možno dosáhnout buď detailnějším modelováním letu impaktoru, což je velice náročné (natahování pružin probíhá ručně) nebo zajištěním letu impaktoru přesně v ose, což vyžaduje modifikaci testovacího zařízení.

Další potenciálním směrem vývoje materiálového modelu by mohlo být zahrnutí vlivu teploty, která má také vliv na chování materiálu.

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval prof. Ing. Petru Horylovi, CSc., dr.h.c. za odborné vedení a věnovaný čas. Dále bych rád poděkoval firmě Varroc Lighting Systems a konzultantům z této firmy, jmenovitě Ing. Adamovi Pilčíkovi a Ing. Martinu Biskupovi, PhD za cenné rady a připomínky při zpracování práce.

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Schéma propylenu.....	13
Obrázek 2 - Časová závislost poměrné deformace [4]	15
Obrázek 3 - Základní reologické modely plastů [7]	16
Obrázek 4 - Konstitutivní model pro termoplasty [10].....	16
Obrázek 5 - Experimenty dle rychlosti poměrné deformace [6,12]	17
Obrázek 6 - Schéma uchycení vzorku [15].....	19
Obrázek 7 - Geometrie vzorku.....	20
Obrázek 8 - Oblast zaměřena kamerou	20
Obrázek 9 - Vznik „křejzů“	21
Obrázek 10 - Sít' konečných prvků na vzorku	38
Obrázek 11 - Detail na sít' vzorku.....	38
Obrázek 12 - Okrajové a počáteční podmínky	39
Obrázek 13 - Geometrie světloometu s přípravkem	45
Obrázek 14 - Detail zjemnění sítě v oblasti vnitřního úchyty	47
Obrázek 15 - Detail sítě na žebrování vnějšího úchyty	47
Obrázek 16 - Detail spojení pouzdra světloometu a krycího skla – lepidlo černou barvou ..	48
Obrázek 17 - Detaily uchycení světloometu a dorazu impaktoru.....	49
Obrázek 18 - SPC spojení objemových prvků snímače a plošných prvků přípravku.....	50
Obrázek 19 - Spodní úchyt s detaily	50
Obrázek 20 - Okrajové a počáteční podmínky	51
Obrázek 21 - Náorné zobrazení ploch s automatickým kontaktem	51
Obrázek 22 - Předefinování kritérií pro vymazání elementu.....	52
Obrázek 23 - Vizualizace posuvů simulace	54
Obrázek 24 - Rozložení poměrných deformací	56
Obrázek 25 - Rozložení rychlosti poměrné deformace	57
Obrázek 26 - Rozložení Von Mises napětí	58
Obrázek 27 - Rozlišení tahového (+) a tlakového (-) Von Mises napětí a jejich vliv na lom materiálu	58
Obrázek 28 - Stroj na vystřelení impaktoru.....	59
Obrázek 29 - Upevnění světloometu v přípravku	60
Obrázek 30 - Vizualní porovnání experimentu a simulace.....	61
Obrázek 31 - Chování materiálu okolo vnitřního úchyty	62
Obrázek 32 - Lom vnitřního úchyty při experimentu	62
Obrázek 33 - Snímky dopadu impaktoru na doraz	63

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Informace o testech – obsahem technické zprávy [27]	20
Tabulka 2 - Veličiny popisující lineární elasticitu – tabulka je obsahem technické zprávy [27]	31
Tabulka 3 - Stanovené hodnoty – tabulka je obsahem technické zprávy [27]	34
Tabulka 4 - Konkrétní definice materiálové karty – tabulka je obsahem technické zprávy [27]	39
Tabulka 5 - Přehled použitých materiálových modelů	52
Tabulka 6 - Přidaná hmotnost do modelu	53
Tabulka 7 - Shrnutí srovnání výsledků simulace a experimentu	67
Tabulka 8 – Závěr	68

Seznam grafů

Graf 1 - Časová odezva sil – data jsou obsahem technické zprávy [27]	21
Graf 2 - Pracovní diagramy– data jsou obsahem technické zprávy [27]	22
Graf 3 - Vypočtené rychlosti poměrných deformací– data jsou obsahem technické zprávy [27]	23
Graf 4 - Průběh zátěžné síly u experimentu [20]	30
Graf 5 - Průběh poměrné deformace po aplikaci zátěžné síly [20]	30
Graf 6 - Závislost zbytkové poměrné deformace na poměrné deformaci vzniklé po aplikaci zátěžné síly [20]	30
Graf 7 - Možnosti určení počátku plasticity a poloha plastického bodu [20]	31
Graf 8 - Křivky se sjednocenou elastickou částí – kompletní graf je obsahem technické zprávy [27]	31
Graf 9 - Průběh rychlostí poměrné deformace [21]	32
Graf 10 - Průběh napětí [21]	32
Graf 11 - Příklad změny transformační matice [21]	33
Graf 12 - Data po přepočtu na plastickou poměrnou deformaci – kompletní graf je obsahem technické zprávy [27]	34
Graf 13 - Časový průběh škálování hmotnosti	55
Graf 14 - Časový průběh složek sil na vnitřním úchytu	63
Graf 15 - Časový průběh složek sil na vnějším úchytu	64
Graf 16 - Rozdíly velikostí sil na vnitřním úchytu	66
Graf 17 - Rozdíly velikostí sil na vnějším úchytu	67

Vzhledem k výlučnému duševnímu vlastnictví dílčích výsledků práce podléhají části některých kapitol utajení. Pro případ kontroly je plné znění práce uloženo na Katedře aplikované mechaniky. Pro zachování systematičnosti mezi technickou zprávou [27] a diplomovou prací je číslování grafů zachováno i přes utajená data.

Reference

- [1] JONŠTA, Zdeněk. *Technické materiály II: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2574-8.
- [2] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [3] RAM, Arie. *Fundamentals of polymer engineering*. New York: Springer Science+Business Media, 1997. ISBN 978-1-4899-1824-6.
- [4] RÖSLER, Joachim, H. HARDERS a M. BÄKER. *Mechanical behaviour of engineering materials: metals, ceramics, polymers, and composites*. New York: Springer, 2007. ISBN 978-3-540-73446-8.
- [5] POKLUDA, Jaroslav, František KROUPA a Ladislav OBDRŽÁLEK. *Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek: (kovy, keramika, plasty)*. Brno: PC-DIR, 1994. ISBN 80-214-0575-9.
- [6] SIVIOUR, Clive R. a Jennifer L. JORDAN. High Strain Rate Mechanics of Polymers: A Review. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*[online]. 2016, 2(1), 15-32 [cit. 2019-01-29]. DOI: 10.1007/s40870-016-0052-8. ISSN 2199-7446. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s40870-016-0052-8>
- [7] MOLLIKOVÁ, Eva. Polymery – struktura a vlastnosti. [přednáška]. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT. Ústav materiálových věd a inženýrství, předmět Fyzika materiálů 29. 1. 2019. Dostupný z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/fyzika_materialu/prednasky/09_polymery%20-%20struktura%20a%20vlastnosti.ppt
- [8] BITTNAR, Zdenek a Jiří ŠEJNOHA. *Numerické metody mechaniky*. Praha: ČVUT, 1992. ISBN 80-01-00855-x.
- [9] HAWARD, R.N. a G. THACKRAY. The use of a mathematical model to describe isothermal stress-strain curves in glassy thermoplastics. *Proceedings of the Royal Society of London: Series A*. 1968, 302(1471), 453-72.

- [10] POLANCO-LORIA, Mario, Arild H. CLAUSEN, Torodd BERSTAD a Odd Sture HOPPERSTAD. Constitutive model for thermoplastics with structural applications. *International Journal of Impact Engineering*[online]. 2010, 37(12), 1207-1219 [cit. 2019-01-30]. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.06.006. ISSN 0734743X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734743X10001065>
- [11] RAGHAVA, Ram, Robert M. CADDEL a Gregory S. Y. YEH. The macroscopic yield behaviour of polymers. *Journal of Materials Science*. 1973, (8(2)), 225-32.
- [12] FIELD, J.E., S.M. WALLEY, W.G. PROUD, H.T. GOLDREIN a C.R. SIVIOUR. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2004, 30(7), 725-775 [cit. 2019-02-07]. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2004.03.005. ISSN 0734743X. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734743X04000521>
- [13] MULLIKEN, A.D. a M.C. BOYCE. Mechanics of the rate-dependent elastic–plastic deformation of glassy polymers from low to high strain rates. *International Journal of Solids and Structures* [online]. 2006, 43(5), 1331-1356 [cit. 2019-02-21]. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2005.04.016. ISSN 00207683. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020768305002313>
- [14] CHEN, Weinong Wayne. Experimental Methods for Characterizing Dynamic Response of Soft Materials. *Journal of Dynamic Behavior of Materials* [online]. 2016, 2(1), 2-14 [cit. 2019-02-22]. DOI: 10.1007/s40870-016-0047-5. ISSN 2199-7446. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s40870-016-0047-5>
- [15] ZRIDA, M., H. LAURENT, V. GROLLEAU, G. RIO, M. KHLIF, D. GUINES, N. MASMOUDI a C. BRADAI. High-speed tensile tests on a polypropylene material. *Polymer Testing* [online]. 2010, 29(6), 685-692 [cit. 2019-02-22]. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2010.05.007. ISSN 01429418. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142941810000784>
- [16] RAISCH, Sven Robert a Bernhard MÖGINGER. High rate tensile tests – Measuring equipment and evaluation. *Polymer Testing* [online]. 2010, 29(2), 265-272 [cit. 2019-02-22]. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2009.11.010. ISSN 01429418. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142941809001901>
- [17] LOBO, Hubert. Methodology for Selection of Material Models for Plastics Impact Simulation. *6th European LS-DYNA Users' Conference: Gothenburg, Sweden* [online]. 29.5.2007 [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: <https://www.dynalook.com/conferences/european-conf-2007/methodology-for-selection-of-material-models-for.pdf>

- [18] HUBERTH, Frank, Stefan HIERMAIER a Marika NEUMANN. Material Models for Polymers under Crash Loads: Existing LS-DYNA Models and Perspective. *4th LS-DYNA Anwenderforum* [online]. Bamberg, 2005 [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <https://www.dynamore.de/de/download/papers/forum05/material-models-for-polymers-under-crash-loads>

- [19] LOBO, Hubert a Brian CROOP. *A ROBUST METHODOLOGY TO CALIBRATE CRASH MATERIAL MODELS FOR POLYMERS* [online]. [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.557.9697&rep=rep1&type=pdf>

- [20] LOBO, Hubert a Hurtado JUAN. *Characterization and Modeling of Non-Linear Behavior of Plastics* [online]. January 2006 [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/268054968_Characterization_and_Modeling_of_Non-Linear_Behavior_of_Plastics

- [21] HAASE, Thomas. A Method for the Conversion of Experimental Flow Curves to constant Strain Rates as Input for Material Models. *13th LS-DYNA Forum, Bamberg, 2014* [online]. [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <https://www.dynamore.de/de/download/papers/2014-ls-dyna-forum/documents/material-ii/a-method-for-the-conversion-of-experimental-flow-curves-to-constant-strain-rates-as-input-for-material-models>

- [22] COOK, Robert Davis, David S. MALKUS a Michael E. PLESHA. *Concepts and applications of finite element analysis*. 3rd ed. New York: Wiley, c1989. ISBN 9780471847885.

- [23] BATHE, Klaus-Jürgen. *Finite element procedures*. New Jersey: Prentice Hall, 2006. ISBN 978-0979004902.

- [24] *LS-DYNA: Základní školení*. SVS FEM.

- [25] *LS-DYNA Keyword user's manual: Volume II Material Models, Version 971*. March 2012. Livermore Software Technology Corporation (LSTC).

- [26] *LS-DYNA Keyword user's manual: Volume I, Version 971 R6.0.0*. February 2012. Livermore Software Technology Corporation (LSTC).

- [27] ROHEL, Daniel. *Materiálové modely plastů a jejich implementace pro simulace crash testů světlometů*. Ostrava, 2019. Technická zpráva. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce: Petr Horyl.